Heikki Lehto • Raimo Havukainen • Jukka Maalampi • Janna Leskinen

FYSIIKKA 8

Aine ja säteily

Sanoma Pro Oy • Helsinki

Tiedustelut
Sanoma Pro Oy, Helsinki
puh. 020 391 000
sähköposti: asiakaspalvelu@sanomapro.fi

www.sanomapro.fi

Kustantaja: Sanoma Pro Oy
Tämä aineisto on digitaalinen rinnakkaisversio
tuotteesta ISBN 978-952-63-0126-6 Fysiikka 8

12 kk lisenssi ISBN 978-952-63-2369-5
48 kk lisenssi ISBN 978-952-63-2360-2

Toimitus: Juho Niemelä
Typografia: Riitta Piuva
Kansi: Heli Ahola, Riitta Piuva
Kannen kuvitus: SPL / Goronwy Tudor Jones, University of Birmingham
Taitto: MacSet Oy / Tarja Lamberg
Piirrokset: Eila Sinivuori
Valokuvat: ks. s. 191

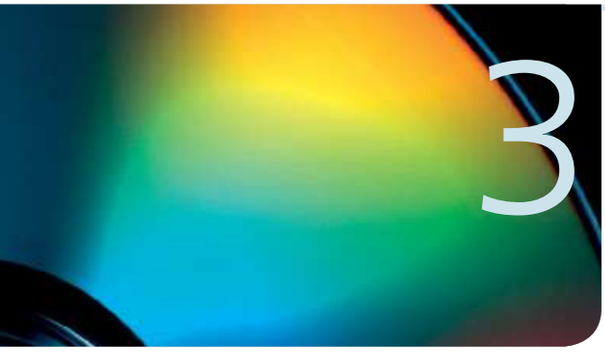
© Heikki Lehto, Raimo Havukainen, Jukka Maalampi, Janna Leskinen ja Sanoma Pro Oy

Kopiointiehdot
Tämä teos on digitaalinen oppikirja, joka on suojattu tekijänoikeuslailla (404/61).

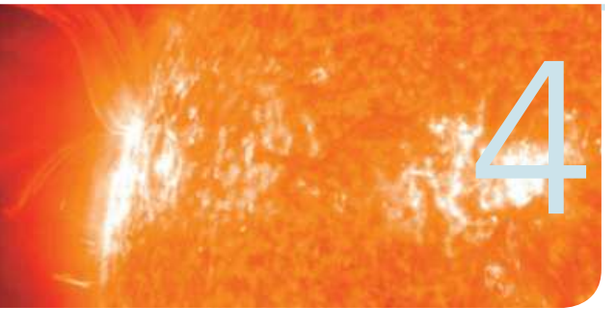
Sisällys

Säteily ja kvantit 7
Moderni fysiikka syntyy 8
1.1 Säteily paljastaa uutta fysiikkaa 10
Mustan kappaleen säteily 11
Valon kvanttiteoria 13
1.2 Valosähköinen ilmiö 17
Comptonin ilmiö 24
1.3 Röntgensäteily 27
Röntgenputken toiminta 28
Röntgensäteilyn spektri 28
1.4 Aaltohiukkasdualismi 32
Kaksoisrakokoe 32
Aineen ja säteilyn duaalisuus 34

Atomi ja aineen rakenne 41
Aavistus atomista 42
2.1 Varhaiset atomimallit 43
Thomsonin atomimalli 43
Rutherfordin atomimalli 43
Bohrin malli vetyatomille 45
2.2 Atomin energiatilat 47
Energiatasokaavio 47
Vetyatomin energiatilat 49
Fluoresenssi ja fosforesenssi 52
Laser 54
2.3 Kvanttimekaaninen atomimalli 58



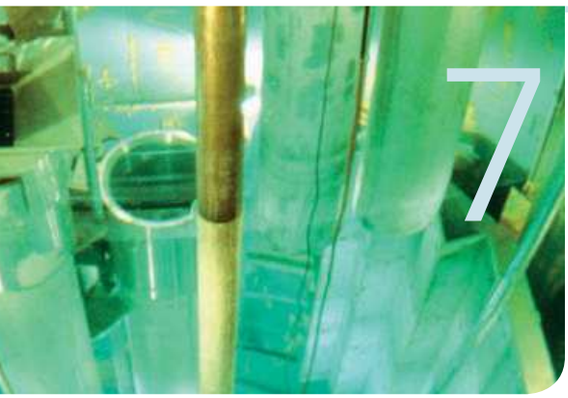
Aineen rakenteen tutkiminen 63
Aineen rakenteen tutkimus kehittyy 64
3.1 Spektrit 65
Emissiospektri 66
Absorptiospektri 68
Vetyatomin spektri 69
3.2 Röntgensäteilyn käyttö aineen tutkimuksessa 73
3.3 Mikroskoopit aineen rakenteen tutkimuksessa 78



Atomin ydin 83
4.1 Ytimen rakenne 84
4.2 Ydinvoima 87
Atomimassayksikkö 88
Massa ja energia 89
4.3 Sidosenergia ja massavaje 90

Radioaktiivisuus ja ydinsäteily 97
Radioaktiivisuus havaitaan 98
5.1 Radioaktiivisuus 100
5.2 Alfahajoaminen 103
5.3 Beetahajoaminen 109
β^--hajoaminen 111
β^+-hajoaminen 113
5.4 Elektronisieppaus 115
5.5 Gammasäteily 118
Heikennyslaki 120
Gammasäteilyn ja aineen vuorovaikutustapoja 122
Syövän sädehoito kehittyy 124

Hajoamislaki 129
6.1 Aktiivisuus ja hajoamislaki 130
Hajoamissarjat 130
Aktiivisuus 130
Hajoamislaki 132
Puoliintumisaika 133
6.2 Radiohiiliajoitus 140
6.3 Säteilyturvallisuus 143



Energiaa ytimestä 147
7.1 Ydinreaktiot 148
7.2 Fissio ja fuusio 151
Fissio 151
Fuusio 153
7.3 Ydinenergia 156
Fissiovoimalaitos 156
Ydinvoimalaitostyypit 158
Alkuaineiden synty 161

Hiukkasfysiikka 165
8.1 Standardimalli 166
Perushiukkasten perheet 167
Vuorovaikutukset 168
8.2 Alkeishiukkaset 170
Hadronit 170
Antihiukkanen ja antiaine 170
8.3 Hiukkasten tutkiminen 172
8.4 Fysiikan tutkimuksen suuret haasteet 174

Kertaustehtäviä 179
Vastauksia 186
Hakemisto 190

Opettajalle ja opiskelijalle

Fysiikka 8 -kirja sisältää lukiofysiikan kahdeksannen kurssin Aine ja säteily oppiaineksen. Kirjan taustalla on pitkä kehitystyö sekä opettajilta saadut toiveet ja palautteet.

Kirjassa on selkeä ja havainnollinen esitystapa sekä moderni ja rauhallinen ulkoasu, joka houkuttelee tutkimaan kirjaa. Uuteen asiaan tutustutaan teoriatekstien, oppilastöiden ja esimerkkien sekä valokuvien, piirrosten ja kaavioiden avulla. Kirjan rakenne sallii eriyttämisen opettajan asettamien tavoitteiden mukaan.

Fysiikka 8 -kirja käsittelee aineen rakenteeseen ja säteilyyn liittyviä ilmiöitä, joissa kokeet ja teoria liittyvät läheisesti yhteen. Kirjassa on yksinkertaisin välinein toteutettavia oppilastöitä ja tietokoneavusteisia mittauksia. Tietokoneavusteiset mittaukset on esitelty niin, että työn toteutus käy selville, vaikka koulussa ei olisikaan käytettävissä tietokoneavusteista mittausjärjestelmää.

Fysiikan historian opiskelu auttaa ymmärtämään, miten fysiikan teoriat rakentuvat aikaisemman tiedon pohjalle ja miten ne ovat syntyneet lukuisten eri aikakausina työskennelleiden ihmisten ponnistelujen tuloksena. Tässä kirjassa fysiikan historiallinen tausta otetaan esille asiayhteydessään.

Kirjassa on runsaasti erityyppisiä tehtäviä: ajatuksia herättäviä **pohdi ja etsi** -tehtäviä, **perinteisiä laskutehtäviä**, opiskelijan itsearviointiin tarkoitettuja **testaa, osaatko** -tehtäviä sekä **kertaustehtäviä** kirjan lopussa. Kaikkia tehtäviä ei ole tarkoitus käsitellä oppitunneilla, vaan opiskelijan on hyvä edistää oppimistaan ratkaisemalla tehtäviä myös omatoimisesti. Tehtävien ratkaisut tulee opetella esittämään selkeästi ja perustellusti.

Opetussuunnitelman edellyttämät aihekokonaisuudet, kuten hyvinvointi ja turvallisuus sekä teknologia ja yhteiskunta, ovat kirjassa luontevasti mukana. Tieto- ja viestintätekniikkaan voidaan perehtyä hyvin pohdi ja etsi -tehtävien avulla. Myös työraporttien ja tutkielmien laadintaa on hyvä harjoitella tälläkin kurssilla.

Kirjaan liittyy runsaasti monipuolista oheismateriaalia.

Jatko-opintoja ajatellen fysiikan opiskelu lukiossa on tärkeää. Monet jatko-opiskelumahdollisuudet luonnontieteiden, lääketieteen, tekniikan, koulutuksen, tutkimuksen ja usein myös liike-elämän aloilla edellyttävät fysiikan opintoja jatkossa.

Menestystä fysiikan opiskeluun!

Elokuussa 2011

Heikki Lehto, Raimo Havukainen,
Jukka Maalampi ja Janna Leskinen

Johdantotehtäviä

Vastaa kysymyksiin aikaisempien tietojesi ja kokemuksiesi perusteella.

1. Olet hammaslääkärissä, ja hampaastasi otetaan röntgenkuva. Miten hammaslääkäri toimii kuvaa otettaessa?

2. Mihin röntgensäteilyä voidaan käyttää teollisuudessa?

3. Mitä yhtälö $E = mc^2$ tarkoittaa?

4. Piirrä kuva atomista.

5. Mitä on fuusioenergia?

6. Miksi asuintaloissa ja työpaikoilla tehdään radonmittauksia?

7. Miksi auringonpaiste lämmittää?

8. Mistä Auringon energia on peräisin?

9. Mistä ydinvoimaloiden energia on peräisin?

10. Mitä hiukkaskiihdyttimellä tehdään?

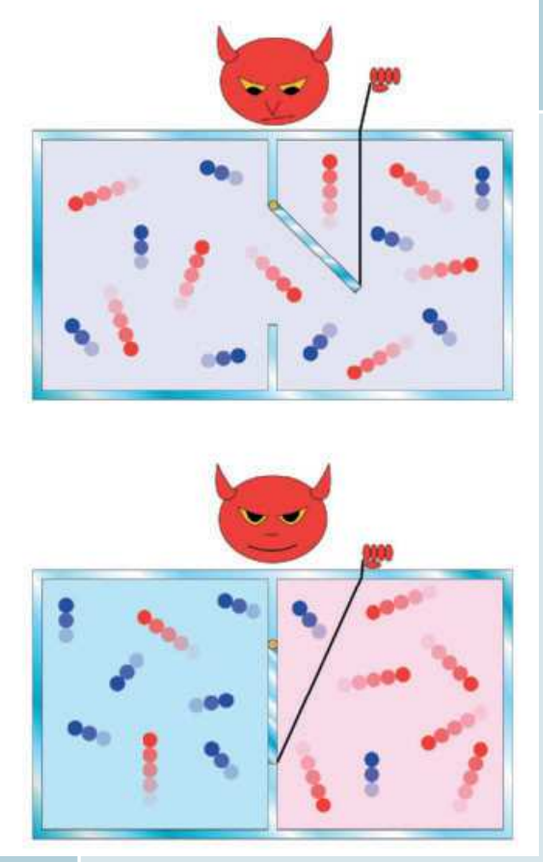
1 Säteily ja kvantit

Tässä luvussa opit

- Planckin kvanttihypoteesin
- valon kvanttiteorian
- valosähköisen ilmiön
- Comptonin sironnan
- röntgensäteilyn
- valon ja hiukkasten kaksois-luonteen.

Keskeisiä käsitteitä ovat

- kvantti
- fotoni
- jarrutussäteily ja ominaissäteily
- dualismi.



Maxwell päätyi siihen, että kaasussa on aina lämpötilasta riippumatta sekä nopeammin että hitaammin liikkuvia molekyylejä.

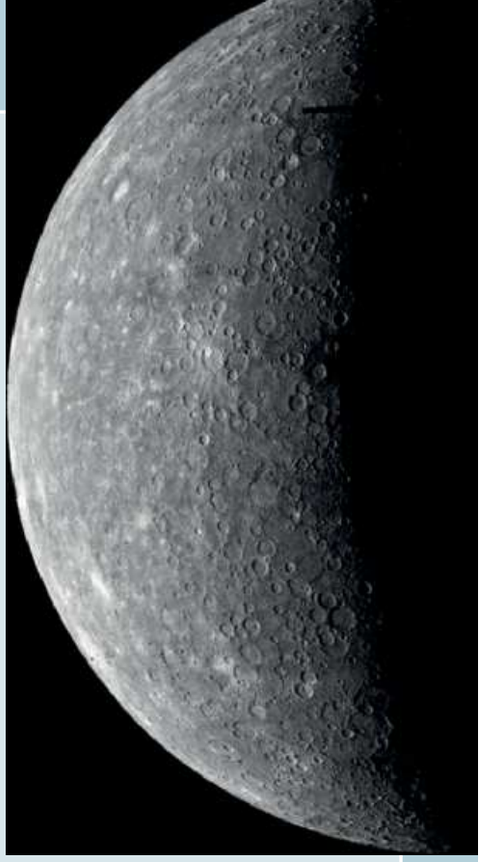
Moderni fysiikka syntyy

1800-luvun loppupuolella monet ajattelivat, että kaikki fysiikan keskeiset lait oli jo keksitty ja jäljellä oli vain yksityiskohtien tarkentaminen. Newtonin mekaniikka näytti toimivan kaikissa tilanteissa, ja Newtonin painovoimalain avulla ymmärrettiin taivaankappaleiden liikkeet. *James Clerk Maxwell* (1831–1879) oli yhdistänyt sähköilmiöiden ja magnetismin lait teoriaksi, joka selitti sähkömagneettiset ilmiöt. Lämpöopin avulla hahmotettiin hyvin makroskooppiset lämpöilmiöt.

1900-luvun alussa tuli kuitenkin esiin monia sellaisia ilmiöitä, joita ei pystytty selittämään näiden vanhojen teorioiden eli **klassisen fysiikan** avulla. Klassinen fysiikka perustui pitkälti ihmisen aistien havaintomaailmaan, makroskooppisiin ilmiöihin.

Kokeellisten menetelmien kehittymisen ansiosta alettiin saada tietoa myös aineen atomimaailmasta. Tehtiin monia uusia ja yllättäviäkin havaintoja, joiden selittämiseen klassisen fysiikan käsitteet ja mielikuvat eivät riittäneet. Tarvittiin uusia ajattelutapoja ja uusia teorioita. Näin syntyi **moderni fysiikka.** Sen tärkeimmät osat ovat kvanttifysiikka ja suhteellisuusteoria.

Kvanttifysiikka tutkii aineen atomitason ilmiömaailmaa, josta on paljastunut monia klassisen fysiikan kuvaamalle maailmalle vieraita piirteitä. Nimi kvanttifysiikka viittaa energian ja muiden suureiden arvojen **epäjatkuvuuteen** mikrotason ilmiöissä. Esimerkiksi elektronin energia atomissa voi saada vain tiettyjä erillisiä arvoja. Tätä kutsutaan **kvantittumiseksi**. Kvantittuminen ei tule ilmi makroskooppisen



Merkuriuksen radan selvittämiseen tarvitaan suhtellisuusteoriaa.

maailman ilmiöissä. Klassisen fysiikan teoriat eivät selitä atomin rakennetta eivätkä aineen lähettämän säteilyn syntyä.

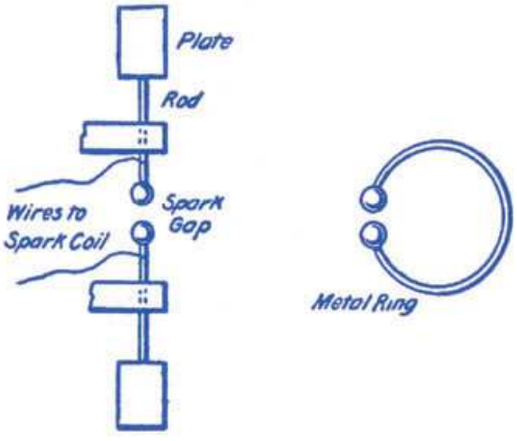
Myös havaittu aineen ja säteilyn kaksoisluonne on piirre, joka erottaa atomitason maailman siitä maailmasta, johon olemme tottuneet aistihavaintojemme kautta. Kaksoisluonne tarkoittaa sitä, että esimerkiksi sähkömagneettinen säteily käyttäytyy joissain tilanteissa aaltomaisesti ja toisissa taas hiukkasmaisesti. Hiukkasilla on vastaavasti aaltomaisia ominaisuuksia.

Albert Einsteinin (1879–1955) luoma suhteellisuusteoria paljasti, että Newtonin mekaniikka ei pidä tarkasti paikkaansa, kun kappaleiden nopeudet ovat suuria. Teoria muutti käsitykset avaruuden ja ajan luonteesta. Aika ja välimatkat ovat suhteellisia, mittaajan liikkeestä riippuvia. Esimerkiksi GPS-paikantimet eivät toimisi, ellei niissä otettaisi huomioon ajan suhteellisuutta. Aineen perusrakenneosaset – alkeishiukkaset – liikkuvat tavallisesti niin suurella nopeudella, ettei niiden liikkeen kuvaaminen onnistu Newtonin lakien avulla vaan kuvaamiseen tarvitaan suhteellisuusteoriaa. Suhteellisuusteoriaa ei käsitellä tällä kurssilla.

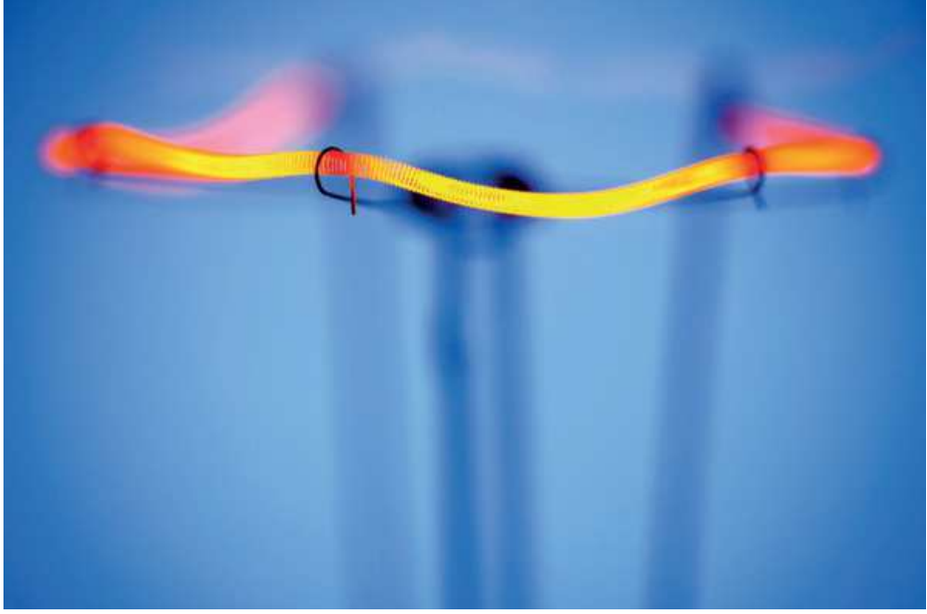
1.1 Säteily paljastaa uutta fysiikkaa

Fysiikka kehittyy yleensä niin, että kokeet paljastavat uuden ilmiön, jota tunnetut teoriat eivät pysty selittämään vaan tarvitaan uusi teoria. Joskus tapahtuu päinvastoin eli matemaattinen teoria ennustaa jonkin aiemmin tuntemattoman ilmiön, jonka olemassaolo havaitaan kokeellisesti vasta jälkeenpäin. Sähkömagneettisten aaltojen löytäminen tapahtui jälkimmäisellä tavalla. Skotlantilainen matemaatikko ja fyysikko *James Clerk Maxwell* (1831–1879) esitti vuonna 1864 sähkövarauksen ja sähkövirran sekä sähkö- ja magneettikentän välisiä riippuvuuksia kuvaavan teorian eli sähkömagnetismin teorian.

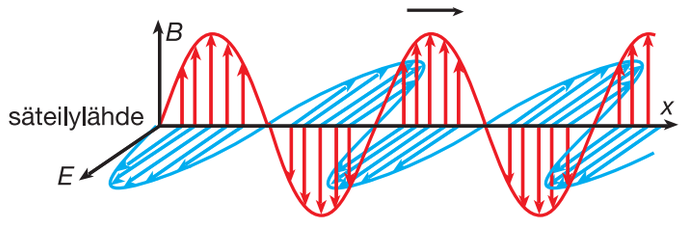
Heinrich Hertz osoitti piirroksen laitteilla sähkömagneettisten aaltojen olemassaolon. Vasemmalla on lähetin, oikealla vastaanotin.



Maxwellin teoria selitti kaikki siihen aikaan tunnetut sähköiset ja magneettiset ilmiöt. Lisäksi se ennusti aiemmin tuntemattoman ilmiön: **sähkömagneettisen säteilyn**. Maxwellin teorian mukaan **kiihtyvässä liikkeessä oleva varauksinen hiukkanen lähettää sähkömagneettista säteilyä**. Saksalainen fyysikko *Heinrich Hertz* (1857–1894) osoitti vuonna 1887 kokeellisesti, että tämä teoreettinen ennustus oli oikea. Hän totesi, että edestakaista värähdysliikettä tekevät elektronit lähettävät sähkömagneettisia aaltoja. Esimerkiksi radiolähettimien toiminta perustuu tähän ilmiöön. Hertz osoitti lisäksi, että sähkömagneettinen aalto etenee valon nopeudella – kuten Maxwell oli ennustanut – ja että valokin on sähkömagneettista säteilyä.



Sähkömagneettinen aalto on sähkökentän ja magneettikentän säännönmukaista värähtelyä aallon etenemissuuntaan nähden kohtisuorassa tasossa. Sähkömagneettisen säteilyn lajit eroavat toisistaan säteilyn syntytavan ja aallonpituuden osalta. Säteilyn aallonpituus riippuu säteilylähteestä. Aallonpituusalueita ovat gammasäteily, röntgensäteily, ultraviolettisäteily, näkyvä valo, infrapunasäteily ja radioaallot (ks. Fysiikka 1, s. 140–146).



Sähkömagneettisen aallon sähkökentän ja magneettikentän suuruudet ja suunnat *x*-akselin eri pisteissä jollakin hetkellä. Kun aika kuluu, aalto etenee oikealle muotonsa säilyttäen.

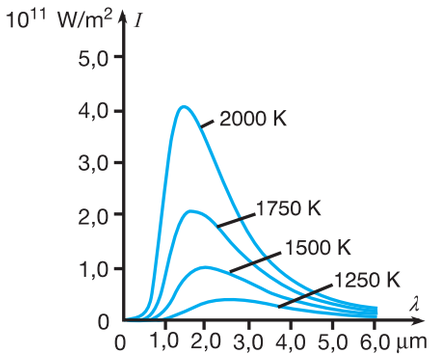
Mustan kappaleen säteily

Grillihiili on kylmänä musta, mutta kuumana se hehkuu kirkkaasti. Hehkulampun wolframilanka on vastaavasti kylmänä tumman harmaa, mutta se lähettää kirkasta valoa, kun sähkövirta kuumentaa sen. Tällaista kappaleiden lähettämää sähkömagneettista säteilyä, joka muuttuu lämpötilan mukaan, kutsutaan **lämpösäteilyksi**.

Lämpösäteilyn spektri on jatkuva, eli kappale säteilee lähes kaikilla aallonpituuksilla. Lämpösäteily syntyy kappaleen atomien ja molekyylien lämpövärähtelyistä. Mitä korkeampi kappaleen lämpötila on, sitä nopeampia nämä värähtelyt ovat. Kuumempi kappale säteilee enemmän energiaa kaikilla aallonpituusalueilla kuin viileämpi. Kappale ei säteile kaikilla aallonpituuksilla yhtä voimakkaasti, vaan säteilyn intensiteetti riippuu aallonpituudesta. Se, millä aallonpituudella säteily on voimakkainta, riippuu kappaleen lämpötilasta.

Ajatellaan suljettua uunia, jonka seinät ovat lämmenneet tiettyyn lämpötilaan. Seinien atomit säteilevät (emittoivat) lämpöliikkeeseen liittyvää sisäenergiaansa sähkömagneettisena säteilynä uunin sisälle. Toisaalta ne imevät (absorboivat) uunissa olevan säteilyn energiaa. Uunissa vallitsee lämpötasapaino, eli uunissa olevasta sähkömagneettisesta säteilystä siirtyy joka hetki seiniin energiaa sama määrä kuin seinistä siirtyy säteilyyn.

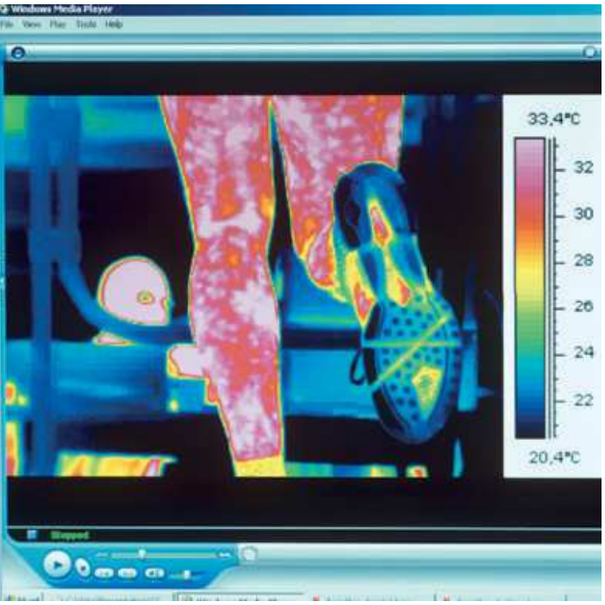
Uunin sisällä olevaa sähkömagneettista säteilyä kutsutaan **mustan kappaleen säteilyksi**. Siinä ovat mukana kaikki aallonpituudet. Kun uunin seinään tehdään pieni reikä, voidaan tämän säteilyn spektri mitata uunin ulkopuolelta häiritsemättä uunissa vallitsevaa tasapainoa. Nimitys musta kappale tulee siitä, että ideaalinen säteilylähde – paitsi että se säteilee kaikilla aallonpituuksilla – absorboi kaiken siihen osuvan säteilyn. Uunin seiniä voi pitää lähes ideaalisina säteilylähteinä. Samoin esimerkiksi grillihiili ja Aurinko ovat lähes ideaalisia mustia kappaleita.



Jos kahden mustan kappaleen lämpötilat ovat samat, kappaleiden spektrit ovat samanlaiset niiden materiaalista ja muodosta riippumatta. Mustan kappaleen spektri riippuu vain kappaleen lämpötilasta. Mitä suurempi kappaleen lämpötila on, sitä pienempi on aallonpituusjakautuman huippua vastaava aallonpituus. Huipun sijainnista voidaan siis määrittää kappaleen lämpötila. Esimerkiksi lämpökamerat määrittävät kohteen lämpötilan tällä tavalla koskematta kohteeseen.

Kun mustan kappaleen spektriä aikoinaan mitattiin, sen huomattiin poikkeavan klassisen fysiikan ennustuksesta. Klassisen fysiikan mukaan mustan kappaleen tulisi säteillä lyhyillä aallonpituuksilla rajattomasti energiaa. Kokeellisesti määritetyistä spektreistä havaittiin kuitenkin, että mustan kappaleen säteilyssä on lyhyillä aallonpituuksilla hyvin vähän energiaa.

Max Planck (1858–1947) esitti vuonna 1900 mallin, joka johti oikeaan mustan kappaleen spektrin tulkintaan. Sen mukaan aine emittoi ja absorboi sähkömagneettista säteilyä vain tietynsuuruisina **energia-annoksina** eli **kvantteina**. Kvantin energia on $E = hf$, jossa f on säteilyn taajuus ja h luonnonvakio, jota kutsutaan Planckin vakioksi.



Urheilukengän hengittävyyttä tutkitaan lämpökameran avulla. Kamera määrittää pintojen lämpötilat pinnan lähettämän lämpösäteilyn spektrin avulla. Lämpötilat esitetään värikoodeina asteikon mukaisesti.

Planckin teoria paljasti luonnosta uuden piirteen, **energian kvantittumisen**. Klassisen fysiikan mukaan energian muutokset ovat jatkuvia, Planckin teorian mukaan energian arvot muuttuvat portaittain.

Planckin kvanttihypoteesi
Aine vastaanottaa ja luovuttaa sähkömagneettista säteilyä vain tietynsuuruisina energia-annoksina eli kvantteina.
Kvantin energia on $E = hf$, jossa f on säteilyn taajuus ja h on Planckin vakio.

Kvantin energian yksikkönä käytetään yleensä elektronivolttia, $[E] = 1$ eV. Planckin vakion arvo on $h = 6{,}6260755 \cdot 10^{-34}$ Js $= 4{,}135669 \cdot 10^{-15}$ eVs.

Valon kvanttiteoria

Albert Einstein esitti vuonna 1905 valon kvanttiteorian. Sen mukaan sähkömagneettinen säteily muodostuu erillisistä hiukkasmaisista osista, **valokvanteista** eli **fotoneista**. Planck oli olettanut mustan kappaleen säteilylakia johtaessaan, että energian kvantittuminen koskee ainoastaan energian siirtymistä kiinteän aineen ja sähkömagneettisen kentän välillä. Sähkömagneettisen säteilyn Planck ajatteli olevan luonteeltaan jatkuvaa. Valon kvanttiteorian mukaan myös itse sähkömagneettinen säteily on kvantittunut.

Fotonit ovat massattomia, ja ne liikkuvat valon nopeudella. Jos säteilyn taajuus on f, fotonin energia on $E = hf$. Koska sähkömagneettisen säteilyn taajuuden f ja aallonpituuden λ välillä on aaltoliikkeen perusyhtälön mukaan riippuvuus $f = \frac{c}{\lambda}$, fotonin energia voidaan esittää myös muodossa $E = hf = \frac{hc}{\lambda}$.

Fotonin liikemäärän suuruus on $p = \frac{h}{\lambda}$ ja suunta fotonin liikkeen suunta. Huomaa, että fotonin liikemäärän lauseke poikkeaa massallisen hiukkasen liikemäärästä, joka on $p = mv$. Fotonin liikemäärä ilmenee mm. säteilypaineena, jonka sähkömagneettinen säteily aiheuttaa kohtaamaansa aineeseen.

Fotonin ominaisuudet
Fotoni on massaton ja liikkuu valon nopeudella. Sen energia E ja liikemäärä p ovat

$$E = hf \text{ ja } p = \frac{h}{\lambda},$$

joissa f on sähkömagneettisen säteilyn taajuus ja λ aallonpituus.

Fotonin energian ja liikemäärän yhtälöitä kutsutaan **Einsteinin yhtälöiksi**.

Esimerkki 1

a) Lampun lähettämän keltaisen valon aallonpituus on 580 nm. Laske valon valokvantin energia.
b) Miksi lampun lähettämä valo aistitaan jatkuvana eikä erillisistä fotoneista koostuvana?
c) Fotonin energia on 16,9 eV. Laske fotonin aallonpituus. Millä aallonpituusalueella säteily on?

$h = 6{,}6260755 \cdot 10^{-34}$ Js $= 4{,}135669 \cdot 10^{-15}$ eVs,
$c = 2{,}99792458 \cdot 10^{8}$ m/s, $\lambda = 580$ nm, $E = 16{,}9$ eV

a) Kvantin energia on

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$
$$= \frac{6{,}6260755 \cdot 10^{-34}\ \text{Js} \cdot 2{,}99792458 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{580\ \text{nm}}$$
$$\approx 3{,}42491 \cdot 10^{-19}\ \text{J} = \frac{3{,}42491 \cdot 10^{-19}}{1{,}6021773 \cdot 10^{-19}}\ \text{eV} \approx 2{,}1\ \text{eV}.$$

Kvantin energia on 2,1 eV.

b) Planckin vakio on hyvin pieni, ja täten myös yhden fotonin energia on yleensä hyvin pieni. Siksi esimerkiksi kattolampusta tulevassa valossa on niin paljon fotoneita, että aistimme valon jatkuvana säteilynä, emme erillisinä fotoneina. Jos lampun teho on 60 W, lamppu säteilee energiaa 60 J sekunnissa. Se vastaa erittäin suurta määrää fotoneita.

c) Fotonin energian yhtälöstä $E = hf = \frac{hc}{\lambda}$ saadaan aallonpituudeksi

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{4{,}135669 \cdot 10^{-15}\ \text{eVs} \cdot 2{,}99792458 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{16{,}9\ \text{eV}} \approx 73\ \text{nm}.$$

Fotonin aallonpituus on 73 nm. Säteilyn aallonpituus osuu röntgensäteilyn ja ultraviolettisäteilyn raja-alueelle.

Esimerkki 2

Säteilyn taajuus on $12 \cdot 10^{18}$ Hz. Laske vastaavan fotonin liikemäärä.

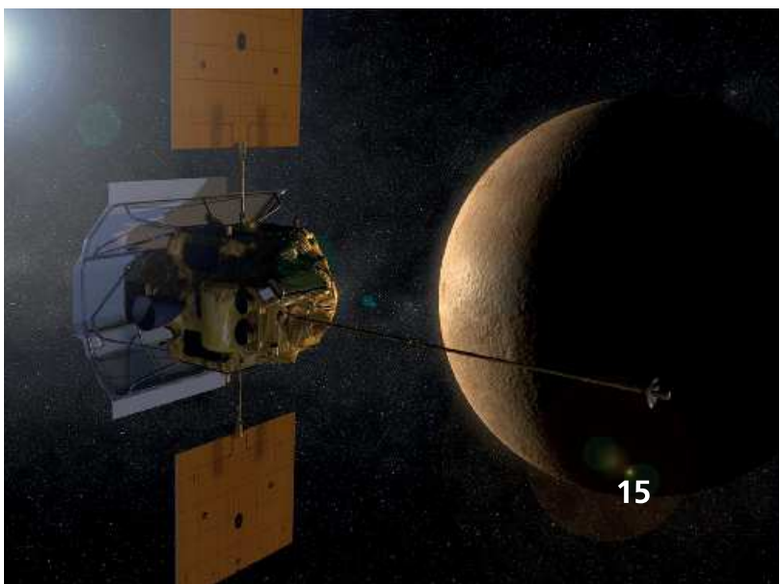
$h = 6{,}6260755 \cdot 10^{-34}$ Js, $\quad c = 2{,}99792458 \cdot 10^{8}$ m/s,
$f = 12 \cdot 10^{18}$ Hz

Fotonin liikemäärä on

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{hf}{c} = \frac{6{,}6260755 \cdot 10^{-34}\ \text{Js} \cdot 12 \cdot 10^{18}\ \text{Hz}}{2{,}99792458 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}$$
$$\approx 2{,}7 \cdot 10^{-23}\ \text{kgm/s}.$$

Liikemäärä on $2{,}7 \cdot 10^{-23}$ kgm/s.

Merkuriusta tutkivaa Messenger-luotainta voidaan ohjata kääntelemällä sen aurinkopaneeleita sopivasti Aurinkoon nähden. Luotaimen liikemäärän muutos on yhtä suuri kuin paneeleihin osuvien fotonien yhteenlaskettu vastakkaissuuntainen liikemäärän muutos. Fotonit pystyvät kääntämään myös komeetan pyrstön poispäin Auringosta.



Pohdi ja etsi

1-1. a) Mihin lämpökameran toiminta perustuu?
b) Ota selvää, millä aallonpituudella ihmisen lähettämä säteily on voimakkainta. Millaista säteily on luonteeltaan?

1-2. a) Miksi noki on mustaa?
b) Voidaanko mustaa aukkoa pitää ideaalisena mustana kappaleena?

1-3. a) Ota selvää, mikä on Auringon säteilypaine Maassa. Vertaa sitä ilmanpaineeseen.
b) Mikä on aurinkopurje, ja mihin sen toiminta perustuu?

Tehtäviä

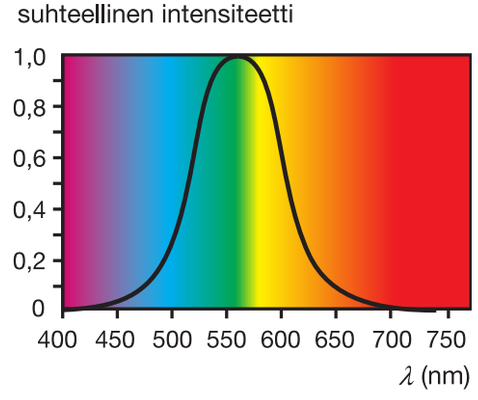
1-4. a) Röntgensäteilyn taajuus on $1{,}2 \cdot 10^{18}$ Hz. Laske säteilyn kvantin energia.
b) Radioaaltojen aallonpituus on 150 m. Laske vastaavan kvantin energia.
c) Fotonin energia on 1,8 keV. Laske sen säteilyn aallonpituus, jota tämä fotoni vastaa.

1-5. Näkyvän valon aallonpituus vaihtelee välillä 400 nm ... 700 nm. Miten sen fotonien energia vaihtelee?

1-6. Valon aallonpituus on 480 nm. Laske yhden fotonin a) energia b) liikemäärä.

1-7. Auringonvalon intensiteetti Maan pinnalla on noin 1 400 W/m^2. Säteily on voimakkainta keltaisen valon kohdalla eli aallonpituudella 600 nm. Arvioi, kuinka monta Auringosta peräisin olevaa fotonia iskeytyy sekunnin aikana yhdelle neliömetrille.

1-8. Ihmisen silmä on herkin keltavihreälle valolle. Pienin energiamäärä, jonka silmä havaitsee valona, on 10^{-17} J. Kuinka monta fotonia tarvitaan, jotta näköhavainto syntyy?



1-9. Matkapuhelin toimii 1 900 MHz:n taajuudella. Mikä on tätä kenttää vastaavien fotonien energia?

1-10. Laserosoitin lähettää vihreää valoa ($\lambda = 532$ nm), ja sen teho on 200 mW. Kuinka monta fotonia se lähettää sekunnissa?

1.2 Valosähköinen ilmiö

Oppilastyö ▪ Valosähköinen ilmiö

Hankaa sinkkilevy kiiltäväksi teräsvillalla. Varaa levy negatiiviseksi esimerkiksi eboniittisauvan avulla ja yhdistä levy elektroskooppiin.

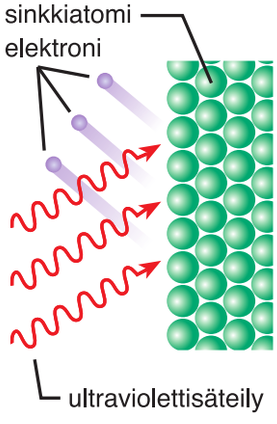
1. Valaise sinkkilevyä hehkulampulla ja piirtoheittimestä saatavalla kirkkaammalla valolla. Tarkkaile elektroskoopin varausta. Kokeile myös laserin valoa.

2. Aseta lasilevy sinkkilevyn eteen. Valaise sinkkilevyä ultraviolettilampulla lasilevyn läpi. Tarkkaile elektroskoopin varausta.

3. Valaise sinkkilevyä edelleen UV-lampulla ja poista sinkkilevyn edessä oleva lasilevy. Tarkkaile elektroskoopin varausta.

4. Siirrä UV-lamppu lähemmäksi sinkkilevyä, jolloin sinkkilevyyn osuvan valon intensiteetti kasvaa. Miten elektroskoopin varaus muuttuu?

Oppilastyössä todetaan, että hehkulampun valo ja laserin valo eivät saa elektroskoopin varausta purkautumaan. Varaus sen sijaan purkautuu, kun sinkkilevyä valaistaan ultraviolettivalolla. Ultraviolettivalo varmistuu varauksen purkautumisen aiheuttajaksi, koska purkautuminen tapahtuu vasta, kun sinkkilevyn edessä oleva lasilevy poistetaan (UV-valo ei juurikaan läpäise lasia). Ultraviolettivalon taajuus on suurempi kuin näkyvän valon taajuus. Varauksen purkaantumisen selitys on **valosähköinen ilmiö**: jos valon taajuus on riittävän suuri, valo irrottaa sinkkilevyn pinnasta elektroneja ja saa levyn negatiivisen varauksen purkautumaan.



Valosähköinen ilmiö
Sähkömagneettisen säteilyn (valon) aiheuttamaa elektronien irtoamista metallin pinnasta kutsutaan valosähköiseksi ilmiöksi.

Heinrich Hertz havaitsi vuonna 1887 valosähköisen ilmiön sattumalta tutkiessaan sähkömagneettisten aaltojen olemassaoloa. Myöhemmin havaittiin, että ilmiössä irronneet hiukkaset ovat elektroneja. Vuonna 1900 *Philipp Lenard* (1862–1947) oivalsi, ettei

metallipinnasta irronneiden elektronien liike-energia riippunut valon voimakkuudesta vaan taajuudesta. Valon voimakkuus vaikutti ainoastaan irronneiden elektronien lukumäärään.

Albert Einstein selitti vuonna 1905 valosähköisen ilmiön valon kvanttiteorian avulla. Hänet palkittiin tästä fysiikan Nobelin palkinnolla vuonna 1921. Metallipintaan osuva säteily koostuu fotoneista, joiden energia on $E = hf$. Säteilyn vaikutus metalliin tapahtuu yksittäisten fotonien ja pinta-atomien elektronien välisenä vuorovaikutuksena. Kohdatessaan elektronin fotoni luovuttaa sille energiansa ja häviää. Osa energiasta kuluu elektronin irtoamiseen metallista, ja loppu ilmenee irronneen elektronin liike-energiana. Irtoamiseen tarvitaan energiaa, koska elektroniin vaikuttaa metallissa sidosvoimia.

Eräitä irrotustöitä

Metalli	W_0/eV
cesium	1,94
natrium	2,28
kalsium	3,10
sinkki	4,34
rauta	4,63
platina	5,66

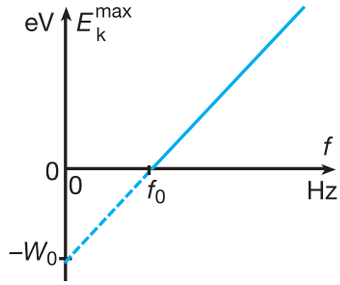
Pienintä mahdollista elektronin irrottamiseen tarvittavaa energiaa kutsutaan **irrotustyöksi** W_0. Irrotustyön arvo on kullekin metallille ominainen. Useimmilla metalleilla sen suuruus on muutamia elektronivoltteja. Alkalimetalleilla on pienin irrotustyö; näkyvä valokin pystyy irrottamaan niistä elektroneja. Useimpien muiden metallien kohdalla valosähköiseen ilmiöön tarvitaan korkeampitaajuista, ultraviolettia säteilyä.

Valosähköisessä ilmiössä fotoni luovuttaa energiansa metallin pinnassa olevalle elektronille. Jos fotonin energia on suurempi kuin irrotustyö, energioiden erotus ilmenee elektronin liike-energiana E_k. Elektronien irrottamiseen tarvitaan eri suuret irrotustyöt, koska elektronien sidosenergiat ovat eri suuria. Eri energiatasoilta irronneilla elektroneilla on eri suuret liike-energiat. Niillä elektroneilla, joiden irrottamiseen tarvitaan energiaa irrotustyön W_0 verran, on suurin liike-energia eli $E_k = E_k^{max}$.

Valosähköisen ilmiön energiayhtälö
Valosähköisessä ilmiössä elektronin suurin mahdollinen energia on

$$E_k^{max} = hf - W_0,$$

jossa E_k^{max} on nopeimman irronneen elektronin liike-energia, f valon taajuus ja W_0 irrotustyö.



Elektronin suurin mahdollinen liike-energia valosähköisessä ilmiössä taajuuden *f* eri arvoilla. f_0 on rajataajuus ja W_0 irrotustyö.

Kun valosähköisen ilmiön mittaustulokset esitetään (f, E_k^{max})-koordinaatistossa, kuvaajaksi saadaan suora. Suoran $E_k^{max} = hf - W_0$ fysikaalisesta kulmakertoimesta saadaan Planckin vakio (vrt. $y = kx + b$). Suoran ja f-akselin leikkauskohdasta saadaan rajataajuus f_0. Irrotustyö W_0 on suoran jatkeen ja E_k^{max}-akselin leikkauskohdan itseisarvo.

Rajataajuudeksi (eli kynnystaajuudeksi) f_0 kutsutaan pienintä säteilyn taajuutta, jolla elektroni saadaan irtoamaan metallin pinnasta. Kun säteilyn taajuus on rajataajuus, koko fotonin energia hf_0 kuluu elektronin irrottamiseen eikä irronneella elektronilla ole lainkaan liike-energiaa. Rajataajuuden arvo määräytyy kyseessä olevan metallin irrotustyöstä, ja se on

$$f_0 = \frac{W_0}{h}.$$

Oppilastyössä hehkulampun ja laserin valot eivät irrottaneet metallista elektroneja. Niiden lähettämien säteilyjen taajuudet olivat pienempiä kuin sinkin rajataajuus. UV-lampun lähettämän säteilyn taajuus oli suurempi kuin sinkin rajataajuus, ja säteily sai elektroneja irtoamaan.

Elektronin irtoaminen metallista perustuu elektronin vuorovaikutukseen fotonin kanssa. Rajataajuuden alittava säteily ei saa aikaan valosähköistä ilmiötä, vaikka valon intensiteettiä lisätään tai säteilyn kestoa pidennetään. Fotoneilla ei ole riittävästi energiaa elektronin irrottamiseen. Oppilastyössä sillä ei ollut vaikutusta, että hehkulamppu korvattiin piirtoheittimen kirkkaammalla (intensiteetiltään suuremmalla) valolla. Kun säteilyn taajuus ylittää rajataajuuden, valosähköinen ilmiö tapahtuu. Oppilastyön kohdassa 4 UV-lampun siirtäminen lähemmäs sinkkilevyä lisäsi elektronien irtoamista, koska levyyn osuvan säteilyn intensiteetti kasvoi.

Metallista valosähköisen ilmiön seurauksena irronneiden elektronien liike-energia voidaan määrittää pysäyttämällä ne sähkökentän avulla. Sähköinen voima teksee elektronin pysäyttäessään työn $W = qU$ ja muuntaa elektronin liike-energian sähköiseksi potentiaalienergiaksi. Työn yhtälössä U on kentässä vallitseva vastajännite ja q elektronin varauksen itseisarvo. Nopeimpien elektronien pysäyttämiseen vaadittava vastajännite saadaan yhtälöstä $qU = E_k^{max}$. Vastajännitettä säätämällä saadaan selville elektronien suurin mahdollinen liike-energia E_k^{max} (ks. s. 22).

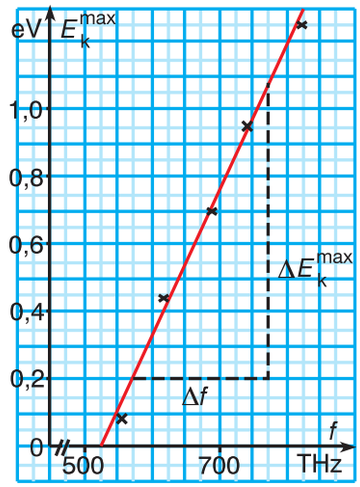
Esimerkki 3

Cesiumin pintaa valaistaan monokromaattisella valolla. Pinnasta irtoavien elektronien suurin liike-energia ja käytetty säteilyn taajuus esitetään taulukossa.

E_k^{max}/eV	1,23	0,94	0,70	0,43	0,08
f/THz	820	741	688	610	549

Määritä mittaustuloksista sopivaa koordinaatistoa käyttäen Planckin vakion arvo sekä valosähköisen ilmiön rajataajuus cesiumille.

Siirretään mittaustulokset (f, E_k^{max})-koordinaatistoon. Planckin vakio on tässä koordinaatistossa suoran $E_k^{max} = hf - W_0$ fysikaalinen kulmakerroin.



Planckin vakiolle h saadaan kuvaajasta arvo

$$h = \frac{\Delta E_k^{max}}{\Delta f} = \frac{0{,}90 \text{ eV}}{210 \text{ THz}} \approx 4{,}3 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}.$$

Suoran ja f-akselin leikkauspisteestä saadaan rajataajuudeksi $f_0 \approx 525$ THz.

Tämän mittauksen perusteella Planckin vakio on $4{,}3 \cdot 10^{-15}$ eVs ja cesiumin rajataajuus 525 THz.

Esimerkki 4

Valo, jonka aallonpituus on 550 nm, pystyy juuri ja juuri irrottamaan natriumista elektroneja.
a) Laske natriumin irrotustyö.
b) Natriumia valaistaan valolla, jonka aallonpituus on 410 nm. Laske natriumista irtoavien nopeimpien elektronien nopeus.

$\lambda_0 = 550\ \text{nm}, \quad \lambda = 410\ \text{nm},$
$h = 4{,}135669 \cdot 10^{-15}\ \text{eVs} = 6{,}6260755 \cdot 10^{-34}\ \text{Js},$
$c = 2{,}99792458 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}, \quad m_\text{e} = 9{,}1093897 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}$

a) Irrotustyö on

$$W_0 = hf_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$$
$$= \frac{4{,}135669 \cdot 10^{-15}\ \text{eVs} \cdot 2{,}99792458 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{550\ \text{nm}} \approx 2{,}3\ \text{eV}.$$

Natriumin irrotustyö on 2,3 eV.

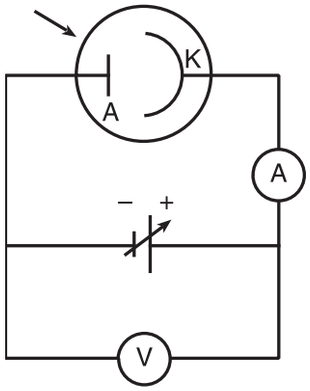
b) Koska käytetyn valon aallonpituus on pienempi kuin a-kohdassa, on fotoneilla nyt suurempi energia. Niin ollen fotonin koko energia ei kulu elektronin irrottamiseen, vaan osa siitä muuntuu elektronin liike-energiaksi. Koska $f = \frac{c}{\lambda}$ ja $W_0 = hf_0 = h\frac{c}{\lambda_0}$, yhtälö $hf = W_0 + E_\text{k}^\text{max}$ saadaan muotoon $\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_0} + \frac{1}{2} m_\text{e} v_\text{max}^2$.

Ratkaistaan elektronin nopeus:

$$\frac{1}{2} m_\text{e} v_\text{max}^2 = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_0} = hc\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0}\right)$$
$$v_\text{max} = \sqrt{\frac{2hc}{m_\text{e}}\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0}\right)}$$
$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 6{,}6260775 \cdot 10^{-34}\ \text{Js} \cdot 2{,}99792458 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{9{,}1093897 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}} \cdot \left(\frac{1}{410\ \text{nm}} - \frac{1}{550\ \text{nm}}\right)}$$
$$\approx 5{,}2 \cdot 10^{5}\ \text{m/s}.$$

Elektronien suurin nopeus on 520 km/s.

Esimerkki 5



Oppilastyössä määritettiin Planckin vakio valokennoa käyttäen. Valokennon säädettävän jännitelähteen avulla etsittiin se pysäytysjännite, joka esti juuri ja juuri elektronien pääsyn anodille. Tällöin anodivirta oli nolla. Kun tutkimuksessa käytetyn valon aallonpituus oli 540 nm, pysäytysjännite oli 0,25 V ja aallonpituutta 310 nm vastaava pysäytysjännite 1,97 V. Määritä näillä tiedoilla Planckin vakio.

$\lambda_1 = 540\ \text{nm}, \quad \lambda_2 = 310\ \text{nm}, \quad U_1 = 0{,}25\ \text{V}, \quad U_2 = 1{,}97\ \text{V},$
$c = 2{,}99792458 \cdot 10^8\ \text{m/s}, \quad q = |-e| = 1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \text{C}$

Anodivirta menee nollaan silloin, kun valon katodilta irrottaman nopeimman elektronin liike-energia ei aivan riitä anodin ja katodin välisen potentiaalieron voittamiseen. Tällöin elektronien suurin liike-energia on yhtä suuri kuin elektroniin kohdistuvan sähköisen voiman tekemä (pysäytys)työ eli $E_\text{k}^\text{max} = qU$, jossa q on elektronin varauksen itseisarvo. Yhtälö $hf = W_0 + E_\text{k}^\text{max}$ saadaan muotoon $hf = W_0 + qU$.

Koska mittauksissa käytettiin kahta eri aallonpituutta (ja taajuutta), saadaan yhtälöpari

$$\begin{cases} hf_1 = W_0 + qU_1 \\ hf_2 = W_0 + qU_2 \end{cases}.$$

Ratkaistaan Planckin vakio yhtälöparista vähentämällä ylemmästä yhtälöstä alempi. Tällöin saadaan $hf_1 - hf_2 = qU_1 - qU_2$, josta Planckin vakio on

$$h = \frac{qU_1 - qU_2}{f_1 - f_2} = \frac{q(U_1 - U_2)}{\frac{c}{\lambda_1} - \frac{c}{\lambda_2}}$$

$$= \frac{1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot (0{,}25\ \text{V} - 1{,}97\ \text{V})}{\frac{2{,}99792458 \cdot 10^8\ \text{m/s}}{540\ \text{nm}} - \frac{2{,}99792458 \cdot 10^8\ \text{m/s}}{310\ \text{nm}}}$$

$$\approx 6{,}7 \cdot 10^{-34}\ \text{Js}.$$

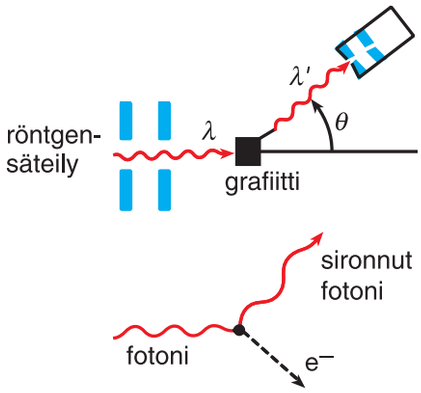
Planckin vakio on tämän tutkimuksen mukaan $6{,}7 \cdot 10^{-34}$ Js.

Tuttuja valosähköiseen ilmiöön perustuvia laitteita ovat valokennot ja aurinkokennot. Myös valaistusmittareissa hyödynnetään valosähköistä ilmiötä. Valokenno on tyhjiöputki, jossa on anodi ja katodi. Valo osuu metalliseen katodiin ja irrottaa siitä elektroneja. Anodin ja katodin välillä on jännite-ero, jonka ansiosta irronneet elektronit siirtyvät anodille ja syntyy sähkövirta. Virran syntymistä tai katkeamista voidaan käyttää erilaisten toimintojen aloittamiseen.

Ruokakaupan kulkuportin valokennossa virta katkeaa, kun asiakas sisään tullessaan hetkeksi estää valonsäteen kulun portin poikki kennoon. Tämä käynnistää portin avautumismekanismin. Kassapöydässä on vastaavanlainen valoportti, joka pysäyttää hihnan liikkeen ostoksen tullessa valoportin kohdalle. Katuvalojen automaattinen syttyminen tapahtuu hämäräkytkimen avulla: kun ilta alkaa pimentyä, hämäräkytkimen valokennossa fotoelektronien määrä ja samalla sähkövirta pienenevät asetetun rajan alapuolelle, mikä laukaisee lamppujen sytytysmekanismin. Kameran valokennojen avulla voidaan mitata kameraan tulevan valon määrä ja asettaa oikea valotusaika.

Aurinkokennoissa käytetään aktiivisena aineena yleensä piitä, josta auringonvalo irrottaa elektroneja. Elektronit johdetaan virtapiiriin, johon muodostuu sähkövirta. Yhden kennon muodostama jännite on hyvin pieni. Aurinkopaneelissa on kytketty sarjaan useita aurinkopareja. Sähkön tuottoa voidaan lisätä kytkemällä rinnan useita aurinkopaneeleita.

Comptonin ilmiö



Arthur Compton (1892–1962) säteilytti vuonna 1923 grafiittikappaletta lyhytaaltoisella säteilyllä (röntgensäteillä). Hän mittasi grafiitista sironneen säteilyn intensiteettiä ja aallonpituutta sirontakulman funktiona. Mittausten mukaan kappaleesta sironneen säteilyn aallonpituus oli suurempi kuin grafiittiin tulevan säteilyn aallonpituus. Sähkömagneettisen säteilyn klassisen mallin mukaan näin ei pitänyt olla. Klassisen mallin mukaan sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus ei muuttuisi sironnassa.

Comptonin ilmiö (Comptonin sironta) voidaan selittää sähkömagneettisen säteilyn kvanttiteorian avulla. Säteilyn fotoni törmää vapaaseen tai atomiin heikosti sidottuun elektroniin. Fotonin liikkeen suunta muuttuu, ja se luovuttaa törmäyksessä osan energiastaan elektronin liike-energiaksi. Koska fotonin energia pienenee törmäyksessä, sironnan jälkeen sen aallonpituus on suurempi kuin tulevan fotonin aallonpituus.

Comptonin ilmiö on **osoitus sähkömagneettisen säteilyn hiukkasluonteesta**. Se varmisti lopullisesti valon kvanttiteorian. Compton sai fysiikan Nobelin palkinnon vuonna 1927.

Pohdi ja etsi

1-11. a) Miksi klassinen fysiikka ei pystynyt selittämään valosähköilmiötä?
b) Miksi säteily ei irrota metallista elektroneja, jos sen aallonpituus on suurempi kuin tietty raja-aallonpituus?

1-12. a) Negatiivisesti varattu sinkkilevy menettää varauksensa UV-säteilyn vaikutuksesta. Miksi sama levy ei menetä varaustaan, jos se varataan aluksi positiivisesti?
b) Riippuuko valosähköisen ilmiön fotoelektronien liike-energia valaisuajan pituudesta?
c) Miten metallille ominainen irrotustyö määrää sen, millaisella säteilyllä elektroneja voidaan irrottaa metallipinnasta?

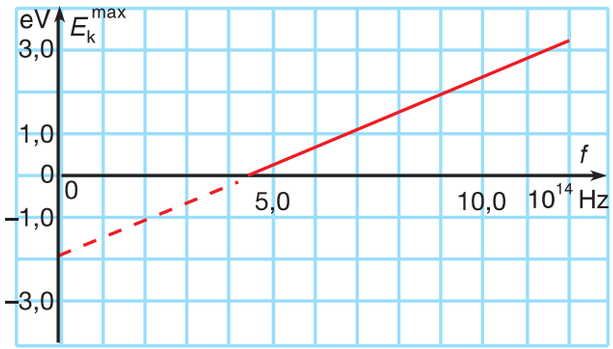
1-13. Mitä haittaa valosähköinen ilmiö aiheuttaa avaruusaluksille?

1-14. Miten valosähköinen ilmiö liittyy Kuun pinnalla leijailevaan pölyyn?

1-15. a) Miten valosähköistä ilmiötä voi käyttää liikkeen tunnistamiseen?
b) Mihin muihin ilmiöihin liikkeentunnistin voi perustua?

Tehtäviä

1-16. a) Sähkömagneettinen säteily kykenee irrottamaan elektroneja natriumin pinnasta. Elektronien liike-energian suurin arvo riippuu säteilyn taajuudesta kuvan mukaisesti. Mitä tietoa saat kuvan esittämästä mittaustilanteesta?



b) Metallipintaan kohdistuva valo saa aikaan sen, että metallipinnasta irtoaa elektroneja. Valon intensiteettiä vähennetään, mutta valon aallonpituus pidetään samana. Mikä seuraavista väittämistä on tosi?

1) Kun intensiteetti alittaa tietyn rajan, elektroneja ei irtoa.
2) Irtoavien elektronien määrä vähenee.
3) Irtoavien elektronien kineettinen energia muuttuu.
4) Irtoavien elektronien kineettinen energia kasvaa.
5) Irtoavien elektronien sekä määrä että kineettinen energia vähenevät.

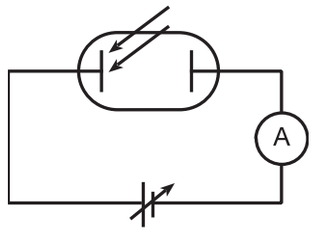
1-17. Sähkömagneettinen säteily, jonka taajuus on 1,23 PHz, pystyy juuri ja juuri irrottamaan metallista elektroneja. Laske irrotustyö elektronivoltteina. Mistä metallista on kysymys?

1-18. a) Kaliumin irrotustyö on 2,24 eV ja alumiinin 4,20 eV. Aiheuttaako valkoinen valo valosähköisen ilmiön näissä aineissa?
b) Alumiiniin osuu säteily, jonka aallonpituus on 210 nm. Laske alumiinista irronneiden nopeimpien elektronien liike-energia.

1-19. Cesium-valokennon elektrodia valaistiin monokromaattisella valolla (kuvio). Piiriin säädettiin jännitelähteen avulla sellainen vastajännite (pysäytysjännite), että virran kulku juuri ja juuri lakkasi. Eri aallonpituuksilla saatiin seuraavat pysäytysjännitteen arvot:

λ/nm	366	405	436	492	546
U/V	1,23	0,94	0,70	0,43	0,08

Määritä sopivaa graafista esitystä käyttäen Planckin vakio ja valosähköilmiön kynnystaajuus cesiumille.



1-20. Cesium-valokennon fotokatodille osuu monokromaattista valoa, jonka aallonpituus on 365 nm ja intensiteetti 6,0 $\mu W/m^2$. Mikä on katodilta irtoavien elektronien liike-energia? Elektronin irrotustyö cesiumista on 1,9 eV. Selosta, miten elektronien liike-energia muuttuu, kun kaksinkertaistetaan valon
1) aallonpituus 2) intensiteetti.

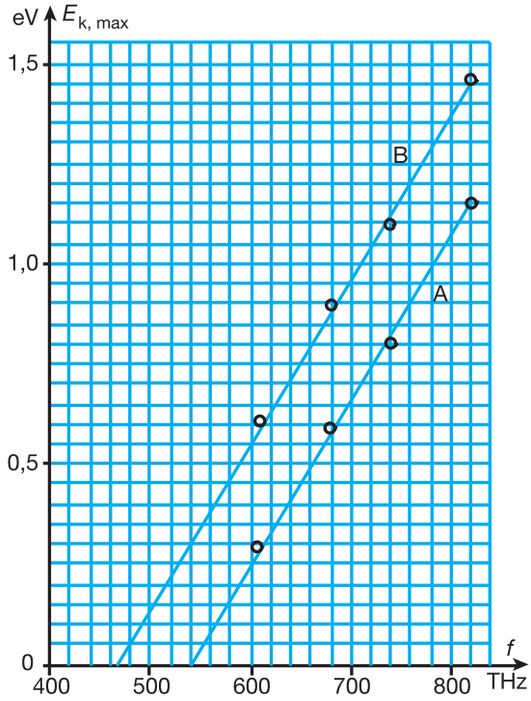
1-21. Kaliumin irrotustyö on 2,24 eV.
a) Laske, mikä on suurin sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus, jolla elektroni vielä irtoaa kaliumin pinnasta.
b) Mikä on elektronin maksiminopeus, kun kaliumnäytettä valaistaan aallonpituudella 436 nm?

1-22. Valokennoa A, jossa on kaliumkatodi, ja valokennoa B, jonka katodimateriaalia ei tunneta, säteilytettiin monokromaattisella valolla. Kun mitattiin valon irrottamien elektronien maksimienergiat, saatiin eri taajuuksilla oheisen kuvion mukaiset tulokset.

a) Miksi suorilla on sama kulmakerroin?

b) Määritä kuvion avulla ilmiön kannalta oleelliset suureet.

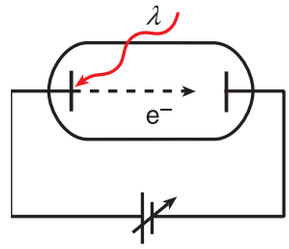
c) Mikä suure pitää tuntea, jos halutaan saada selville valokennon B katodimateriaali? [S1995, 7]



1-23. Säteilyä kohdistetaan ohueen kalvoon, jotta saadaan aikaan Comptonin ilmiö. Säteilyn aallonpituus on 35 pm. Laske pinnassa olevaan vapaaseen elektroniin osuvan fotonin

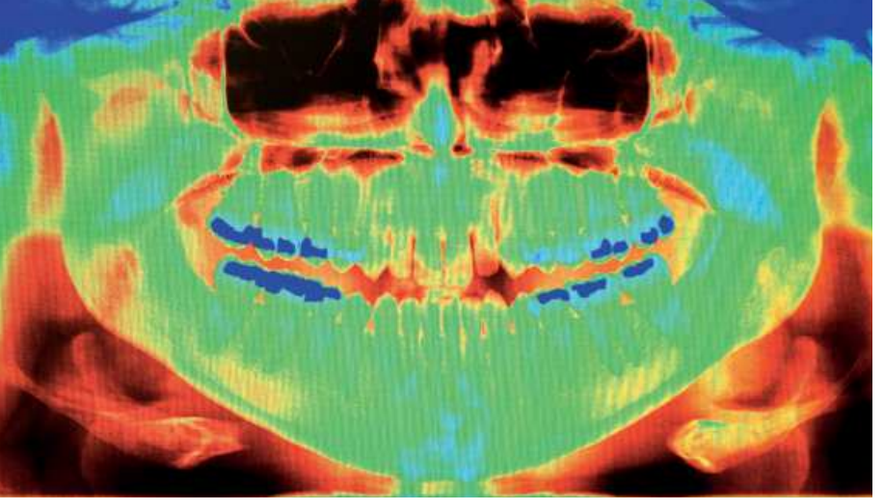
a) energia b) liikemäärä.

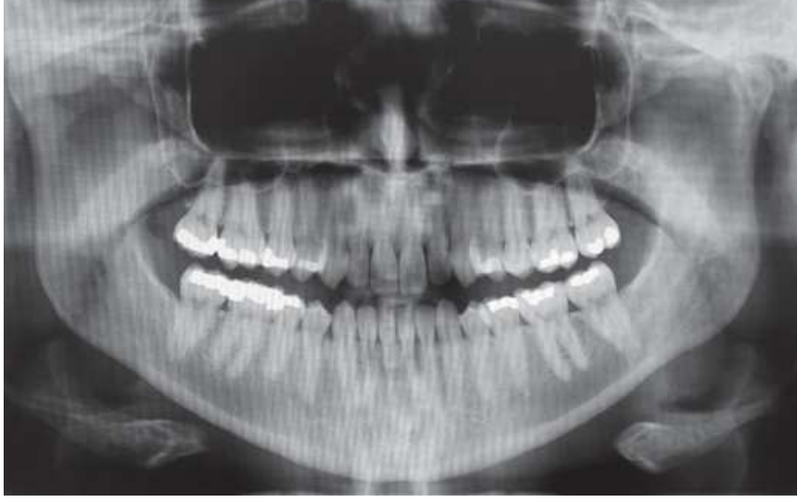
1-24. Kun valo, jonka aallonpituus on 611 nm, osuu valokennoon, tarvitaan 0,31 V:n pysäytysjännite estämään irronneiden elektronien pääsy anodille (kuva). Kuinka suuri pysäytysjännite tarvitaan käytettäessä 489 nm:n valoa?



1-25. Kvantti, jonka energia on 25,0 keV, törmää levossa olevaan aineen vapaaseen elektroniin ja siroaa takaisin tulosuuntaansa. Laske sironneen kvantin energia ja elektronin saama liike-energia.

Valomonistinputkia käytetään heikkojen valonpilkahdusten havaitsemiseen esimerkiksi kokeissa, joissa tutkitaan neutriinoja. Valomonistinputki perustuu valosähköiseen ilmiöön. Perehdy neutriinoihin.



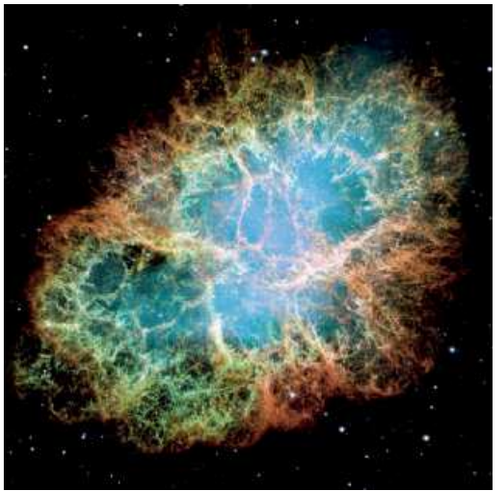


Panoraamaröntgenkuva hampaista muodostetaan digitaalisessa muodossa tietokoneelle. Kuvaa voidaan havainnollistaa värjäämällä eri kudostyypit, jolloin hoitoa tarvitsevat kohdat saadaan paremmin näkyviin.

1.3 Röntgensäteily

Saksalainen *Wilhelm Conrad Röntgen* (1845–1923) tutki kaasupurkausputkea vuonna 1895 ja löysi uuden tuntemattoman säteilylajin, jota hän nimitti X-säteilyksi. Tätä nimitystä käytetään vieläkin anglosaksisissa maissa (engl. *X-rays*). Säteilyn nimi muutettiin myöhemmin röntgensäteilyksi. Ensimmäinen fysiikan Nobelin palkinto jaettiin vuonna 1901, ja sen sai Röntgen tutkimustensa ansiosta. Röntgensäteily on aallonpituudeltaan hyvin lyhyttä sähkömagneettista säteilyä. Röntgen otti vuonna 1895 ensimmäisen röntgenkuvan vaimonsa Berthan kädestä.

Rapusumu lähettää näkyvän valon lisäksi röntgensäteilyä. Rapusumu on jäänne vuonna 1054 havaitusta supernovaräjähdyksestä.

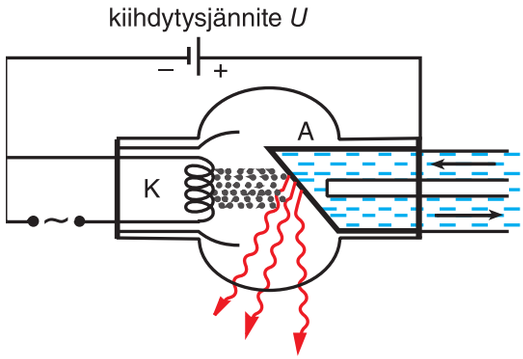


Lääketieteessä röntgensäteilyä on käytetty laajasti heti sen keksimisestä lähtien. Läpivalaisukuvasta voidaan erottaa erityyppiset kudokset. Kuvauksissa voidaan käyttää varjoaineita. Röntgensäteily absorboituu varjoaineisiin ja parantaa siten kuvan kontrastia. Varjoainekuvausta käytetään mm. kuvattaessa ruoansulatuskanavaa tai verisuonistoa. Suurina annoksina röntgensäteily ionisoi kudosta, mikä aiheuttaa solumuutoksia myös syvällä kudoksissa. Tätä säteilyn ominaisuutta käytetään hyödyksi esimerkiksi syöpäsairauksien sädehoidossa.

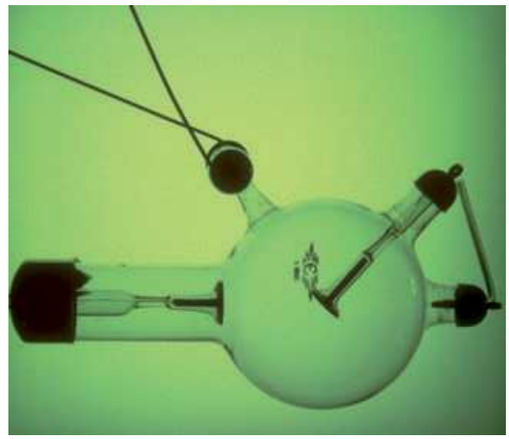
Avaruudessa on röntgenlähteitä. Säteilyn perusteella voidaan tutkia, millaiset olosuhteet kohteessa vallitsevat. Härän tähdistössä sijaitseva Rapusumu on paljon tutkittu röntgenlähde. Se on eräänlainen ”standardikynttilä”, jonka avulla on mahdollista tarkistaa mittalaitteiden asteikko. Monet kaksoistähdet, joissa kaksi tähteä kiertää toisiaan, ovat voimakkaita röntgensäteilijöitä.

Röntgenputken toiminta

Tarkastellaan kuvan mukaista tyhjiöputkea, röntgenputkea. Anodin A ja katodin K välille on kytketty hyvin korkea tasajännite. Elektronit lähtevät negatiiviselta katodilta, ja positiivinen anodi vetää niitä puoleensa. Elektronit joutuvat katodin ja anodin välisessä sähkökentässä kiihtyvään liikkeeseen ja törmäävät hyvin suurella nopeudella anodiin.



Kaaviokuva röntgenputkesta.

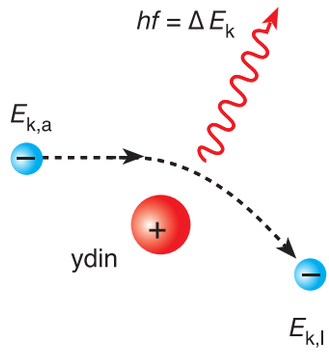


Sähköisen voiman tekemä työ ilmenee elektronin liike-energiana. Kun elektronit kohtaavat anodiaineen ensimmäiset atomikerrokset, ne jarruuntuvat ja pysähtyvät törmäysten takia lyhyessä ajassa: elektronien hidastuvuus on hyvin suuri. Myös elektronin nopeuden suunta muuttuu. Muuttuvassa liikkeessä oleva elektroni (varattu hiukkanen) lähettää sähkömagneettista säteilyä.

Elektronien jarruuntumisesta aiheutuvaa säteilyä kutsutaan röntgenputken **jarrutussäteilyksi**. Elektronien jarruuntumisen takia anodiaine lämpenee voimakkaasti ja sen sisäenergia kasvaa. Ainoastaan noin 0,1 % elektronin liike-energiasta muuttuu säteilyksi. Lämmönkehityksen takia suuritehoisen putken anodia on jäähdytettävä esimerkiksi sen sisällä virtaavalla vedellä.

Röntgensäteilyn spektri

Röntgenputkessa kiihdytetyt elektronit saavat liike-energian $E_{k,a} = qU$, jossa q on elektronin varauksen itseisarvo. Kun elektroni saapuu ytimen sähkökenttään, sen rata kaartuu ja samalla elektroni menettää energiaa säteilemällä fotoneita.

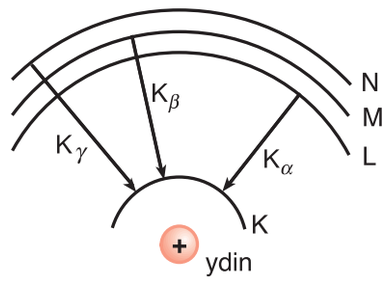


Ytimen ohi menevien elektronien nopeus muuttuu. Tärkeimpiä tekijöitä jarrutussäteilyn synnyssä ovat elektronin suunnanmuutos ja siihen liittyvä normaalikiihtyvyys.

Jarrutussäteilyn suurin taajuus syntyy, kun elektronin koko liike-energia muuntuu yhdeksi fotoniksi: kvantin energia on silloin $hf_{max} = qU$. Taajuuden maksimiarvoksi saadaan $f_{max} = \frac{qU}{h}$. Koska $f_{max} = \frac{c}{\lambda_{min}}$, jarrutussäteilyn aallonpituuden minimiarvo on $\lambda_{min} = \frac{hc}{qU}$, jossa U on putken kiihdytysjännite. Jarrutussäteilyn aallonpituuden alaraja on sitä pienempi, mitä suurempi kiihdytysjännite on.

Jarrutussäteily on yksi osa röntgenputken lähettämästä röntgensäteilystä. Spektrin jatkuvan säteilyn alueet johtuvat jarrutussäteilystä. Jarrutussäteily on riippumaton anodimateriaalista. Röntgenputkesta saadaan myös säteilyä, jonka syntymisen fysikaalinen perusta on aivan toinen.

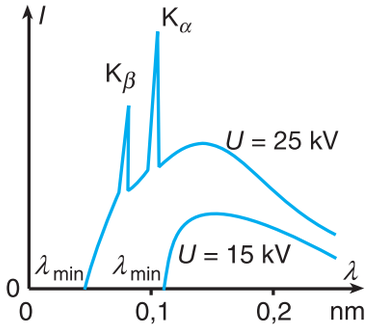
Kun röntgenputken kiihdytysjännite on riittävän suuri, elektroni saa kylliksi energiaa, jotta se voi iskeä elektronin irti kohtaamansa atomin sisemmiltä elektronikuorilta. Syntyneeseen tyhjään paikkaan siirtyy välittömästi toinen elektroni joltain ylemmältä elektronikuorelta. Samalla atomi säteilee sähkömagneettista säteilyä – fotonin, jonka energia on sama kuin elektronikuorten välinen energiaero (ks. s. 48).



Ominaissäteily syntyy, kun elektronit siirtyvät ylemmältä atomin energiatasolta alemmalle energiatasolle.

Jos elektroni irtoaa alimmalta elektronikuorelta eli K-kuorelta ja sen paikalle siirtyy seuraavaksi alimman kuoren eli L-kuoren elektroni, syntynyttä röntgenkvanttia nimitetään K_α-kvantiksi. Jos aukko täyttyy M-kuorelta peräisin olevalla elektronilla, syntynyttä röntgenkvanttia nimitetään K_β-kvantiksi. Röntgenspektrissä K_α-säteilyn intensiteetti on aina suurempi kuin K_β-kvantin, koska elektronin siirtyminen L-kuorelta on todennäköisempää kuin siirtyminen kauempana olevalta M-kuorelta.

Kun hyvin monessa atomissa tapahtuu samanlainen siirtymä, spektrissä havaitaan hyvin kapealla aallonpituusalueella suuri intensiteetti eli graafisessa esityksessä kyseisellä kohdalla on **intensiteettipiikki**. Tätä röntgenputkesta tulevaa säteilyä kutsutaan **ominaissäteilyksi** (karakteristiseksi säteilyksi). Sen aallonpituudet riippuvat vain röntgenputken anodiaineesta, sen atomien elektroniverhon rakenteista ja energioista. Röntgensäteilyn spektrissä on usein monia ominaissäteilyn piikkejä. **Ominaissäteily** on osoitus atomin **energian kvantittumisesta**.



Kuvassa on kahta kiihdytysjännitettä vastaava röntgensäteilyn spektri. Jatkuva spektri syntyy jarrutussäteilystä. Ominaissäteily aiheuttaa intensiteettipiikit.

Kullakin alkuaineella on sille ominainen röntgenspektri. Röntgenspektrin piikkejä tutkimalla voidaan hyvinkin pienistä ainemääristä selvittää näytteen alkuainekoostumus. Jos kiihdytysjännite on pieni, elektroni ei pysty irrottamaan anodin atomista K-kuoren elektronia. Silloin spektrissä ei ole K-piikkejä.

Röntgensäteily

Röntgensäteily on lyhytaaltoista sähkömagneettista säteilyä. Sitä syntyy, kun elektronisuihku osuu metallikohtioon.

Jarrutussäteilyssä elektronin liike-energia muuntuu säteilyn energiaksi.

Röntgenputken ominaissäteilyn aallonpituudet riippuvat röntgenputken anodiaineesta, sen atomien elektroniverhon rakenteista ja energioista.

Ominaissäteily on osoitus atomin energian kvantittumisesta.

Esimerkki 6

Elektronit kiihdytetään röntgenputkessa 21 kV:n jännitteellä. Laske syntyvän röntgensäteilyn pienin aallonpituus.

$U = 21\ \text{kV}, \quad q = |-e| = 1\ \text{e}, \quad h = 4{,}135669 \cdot 10^{-15}\ \text{eVs},$
$c = 2{,}99792458 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}$

Elektroniin vaikuttavan sähköisen voiman tekemä työ on yhtä suuri kuin elektronin potentiaalienergian muutos: $W = qU$, jossa q on elektronin varauksen itseisarvo. Kiihdytyksessä potentiaalienergia muuntuu elektronin liike-energiaksi: $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = hf_{max}$. Röntgensäteilyn pienin aallonpituus (suurin energia) vastaa tilannetta, jossa elektroni luovuttaa koko liike-energiansa yhdelle röntgenkvantille.

Yhtälöstä $qU = hf_{max} = \frac{hc}{\lambda_{min}}$ saadaan röntgensäteilyn pienimmäksi aallonpituudeksi

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{qU} = \frac{4{,}135669 \cdot 10^{-15}\ \text{eVs} \cdot 2{,}99792458 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{1\ \text{e} \cdot 21\ \text{kV}}$$
$$\approx 59 \cdot 10^{-12}\ \text{m}.$$

Pienin aallonpituus on 59 pm.

Esimerkki 7

Kuvio esittää molybdeenin röntgenspektriä. Mikä on ollut röntgenputken jännite spektriä mitattaessa?

$q = |-e| = 1\text{ e}, \quad h = 4{,}135669 \cdot 10^{-15}\text{ eVs},$
$c = 2{,}99792458 \cdot 10^{8}\text{ m/s}$

Kuvasta nähdään, että jarrutussäteilyn lyhin aallonpituus on 32 pm. Elektroniin vaikuttavan sähköisen voiman tekemä työ on yhtä suuri kuin elektronin potentiaalienergian muutos: $W = qU$, jossa q on elektronin varauksen itseisarvo. Kiihdytyksessä potentiaalienergia muuntuu elektronin liike-energiaksi $E_\text{k} = \frac{1}{2}mv^2 = hf_\text{max}$. Yhtälöstä $qU = hf_\text{max} = \frac{hc}{\lambda_\text{min}}$ saadaan röntgenputken jännitteeksi

$$U = \frac{hc}{q\lambda_\text{min}} = \frac{4{,}135669 \cdot 10^{-15}\text{ eVs} \cdot 2{,}99792458 \cdot 10^{8}\text{ m/s}}{1\text{ e} \cdot 34\text{ pm}} \approx 39\text{ kV}.$$

Röntgenputken jännite spektriä mitattaessa on ollut 39 kV.

Tehtäviä

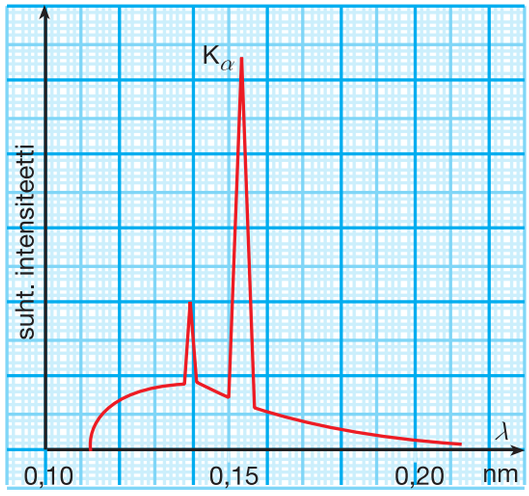
1-26. a) Eräästä röntgenputkesta tulevan säteilyn pienin aallonpituus on $1{,}0 \cdot 10^{-9}$ m. Laske röntgensäteilyn suurin taajuus.
b) Elektronit kiihdytetään röntgenputkessa 15 kV:n jännitteellä. Laske syntyvän säteilyn suurin taajuus.
c) Röntgenputken kiihdytysjännitteenä on 35 kV. Mitkä aallonpituudet esiintyvät syntyvän jarrutussäteilyn spektrissä?

1-27. Kuvaile röntgenputken rakennetta ja toimintaperiaatetta. Hahmottele lisäksi tyypillinen röntgensäteilyn spektri ja perustele sen muoto säteilyn syntymekanismien perusteella.

1-28. Kuinka suuri on röntgenputken jännitteen oltava, jotta syntyisi säteilyä, jonka aallonpituus on 0,15 nm?

1-29. Oheinen kuvio esittää erään röntgenputken lähettämän säteilyn spektriä.
a) Laske putken jännite.
b) Mitä ainetta on putken anodi?
Taulukossa on esitetty eräiden aineiden K_α-röntgenviivojen energiat.

Aine	Al	Cr	Fe	Ni	Cu	Mo
E_{K_α}/keV	1,49	5,41	6,40	7,47	8,04	17,4



1.4 Aaltohiukkasdualismi

Klassisessa fysiikassa hiukkaset ja aallot ovat erillisiä käsitteitä. Hiukkasella on mm. massa ja liikemäärä, ja sen kulkua voidaan periaatteessa seurata joka hetki. Aaltoliike ei ole paikallista: aalloilla on mm. etenemissuunta ja taajuus, ja aallot leviävät ja voivat interferoida.

Kaksoisrakokoe

Oppilastyö ▪ Kaksoisrakokoe hiekalla

Laita telineellä oleva laatikko täyteen hiekkaa. Laatikon pohjassa on kaksi pientä reikää, A ja B. Valuta hiekkaa laatikosta lattialle siten, että

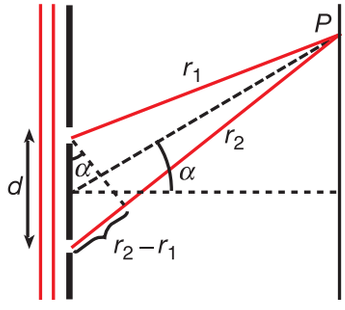
1. reikä A on auki ja reikä B kiinni
2. reikä A on kiinni ja reikä B auki
3. sekä reikä A että reikä B ovat auki.

Miten alustalle muodostuvat hiekkakasat eroavat toisistaan?

Oppilastyö ▪ Kaksoisrakokoe valolla

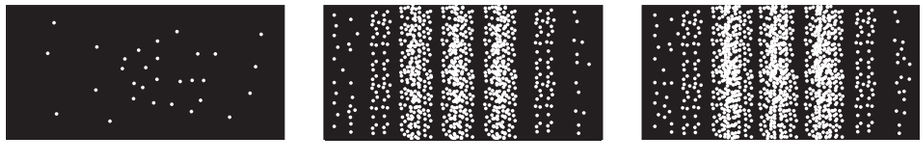
Johda laserin valo kaksoisrakoon. Tutki varjostimella näkyvää valokuviota.

Kun oppilastyön kohdassa 1 valutetaan hiekanjyviä samanaikaisesti raoista A ja B, alustalla havaitaan kaksi erillistä pientä hiekkakasaa. Jos makromaailman hiekanjyvät vastaisivat mikromaailman elektroneja, voisi olettaa, että vastaavanlaiset kaksi maksimia syntyisivät rakojen kohdalle.



Aallot-kurssilla tutkittiin kaksoisraon läpi kulkeneen monokromaattisen valon interferenssikuviota. Varjostimella havaittiin keskellä valomaksimi ja keskikohdan molemmilla puolilla valoisia sivumaksimeja. Esimerkiksi kohdassa P havaitaan valomaksimi, koska säteiden matkaero $r_2 - r_1 = d\sin\alpha$ on valon aallonpituuden kokonainen monikerta $k\lambda$. Ilmiö selitettiin käyttäen valon **aaltomallia**.

Korvataan varjostin esimerkiksi fluoresoivalla pinnalla. Kun nyt valon (sähkömagneettisen aallon) interferenssikuviota tutkitaan mikroskoopilla, nähdään aluksi pinnalla siellä täällä yksittäisten fotonien osumakohtia. Havainto osoittaa, että valo ei käyttäydy klassisen fysiikan aallon tavoin.



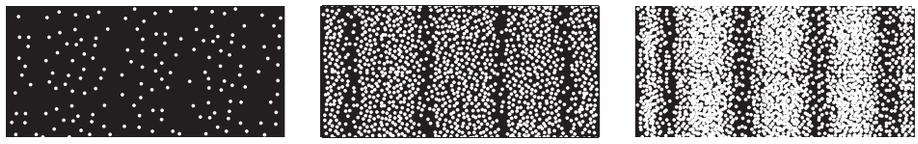
Kaksoisrakokoe valolla: fluoresoivalle pinnalle syntyy valolle tyypillinen interferenssikuvio riittävän pitkän ajan kuluttua.

Havaittu ilmiö voidaan selittää valon **hiukkasmallin** nojalla. Fotoni osuu aina vain yhteen fluoresoivan pinnan kohtaan. Kun fotoneita osuu fluoresoivaan pintaan riittävän kauan, osumakohtien muoto vastaa tyypillistä interferenssikuvion muotoa. Jos valon intensiteetti on pieni, riittävän pitkän ajan kuluttua syntyvä kuvio on samanlainen kuin voimakkaalla valolla aikaansaatu kuvio.

Kun kuvataan mikromaailman kohteita, kuten fotoneja, hiukkas- ja aaltomalli täydentävät toisiaan. Tarkastelemalla suuria hiukkasmääriä saadaan ilmiölle erittäin hyvä ennustettavuus. Suuret hiukkasmäärät noudattavat tilastollisia lakeja. Aalloille ominainen diffraktiokuvio syntyy hiukkasille yksittäisistä osumista, säteilyn lajista tai intensiteetistä riippumatta.

Kertaa diffraktio
Fysiikka 3 -kirjan sivulta 106.

Elektroneilla suoritetut kokeet antavat samanlaisia tuloksia kuin valolla (fotoneilla) suoritetut. Kun koe suoritetaan valolla tai elektroneilla, on aina kyse valtavasta määrästä fotoneja tai elektroneja. Suuren joukon tilastollinen yhteiskäyttäytyminen on ennustettavissa – varjostimelle syntyy ennustettu kuvio. Yksittäisten hiukkasten osumakohtia varjostimella ei voida ennustaa.



Elektroni ei käyttäydy niin kuin klassinen fysiikka ennustaa. Näin ollen elektroneilla on aalto-ominaisuus.

Aineen ja säteilyn duaalisuus

Ranskalainen fyysikko *Louis de Broglie* (1892–1987) esitti vuonna 1924 hypoteesin, jonka mukaan hiukkasilla, kuten elektroneilla, on myös aaltoluonne.

De Broglien päätelmien lähtökohtana oli ajatus, että luonto on yleensä johdonmukaisen symmetrinen. Hän päätteli, että koska sähkömagneettisella säteilyllä on hiukkasluonne, hiukkasiin liittyy vastaavasti aaltoluonne.

De Broglie esitti, että

- aineella ja säteilyllä on molemmilla sekä hiukkassuihkuille että aaltoliikkeelle ominaisia piirteitä
- hiukkasta voidaan kuvata aaltona, jolla on tietty aallonpituus
- hiukkasjoukon etenemistä voidaan tarkastella aalto-opin perusteella
- hiukkasta kuvaavan aaltofunktion aallonpituus on $\lambda = \frac{h}{p}$
- valon nopeudella liikkuvalle fotonille johdettu yhtälö on voimassa myös hiukkasille, jotka liikkuvat valon nopeutta pienemmillä nopeuksilla.

Hiukkasiin liittyviä aaltoja sanotaan **de Broglien aalloiksi**. Hiukkasten aaltomaiset ominaisuudet ilmenevät, kun hiukkasten välimatkat ovat samaa suuruusluokkaa kuin niiden de Broglien aallonpituudet.

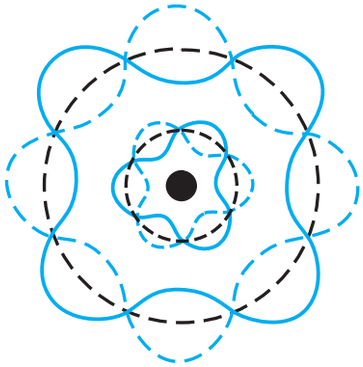
Valon heijastuminen, taittuminen, taipuminen, interferenssi ja polarisaatio selitettiin Aallot-kurssilla valon aaltomallin avulla. Aaltomalli ei selitä Comptonin ilmiötä eikä valosähköistä ilmiötä, vaan selitys vaatii valon hiukkasmallin. Valon aalto- ja hiukkasmallin välillä ei ole ristiriitaa, vaan mallit täydentävät toisiaan. **Valolla on kaksoisluonne eli duaalinen luonne.** Valon heijastuminen ja taittuminen voidaan selittää myös valon hiukkasmallilla.

Havaintojen mukaan mikromaailman ilmiöillä on sekä hiukkasille että aalloille ominaisia piirteitä. Hiukkaset havaitaan ainoastaan siinä paikassa ja sillä hetkellä, kun ne osuvat kohteeseensa. Näin ollen hiukkaset ilmenevät vuorovaikutustapahtumissa. Hiukkasten aalto-ominaisuudet havaitaan vasta, kun esimerkiksi ilmaisimelle osuu riittävästi hiukkasia. Hiukkanen ja aalto ovat malleja, joiden avulla selitetään havaittuja ilmiöitä.

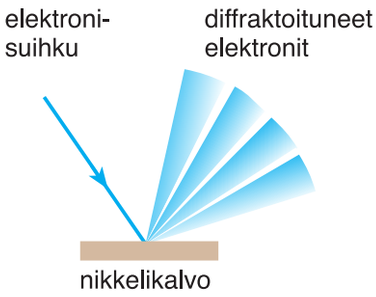
Aaltohiukkasdualismi
Aaltohiukkasdualismin mukaan kaikilla säteilyn lajeilla ja kaikilla hiukkasilla esiintyy sekä hiukkasmallille että aaltomallille ominaisia piirteitä. Niitä yhdistävät de Broglien lait

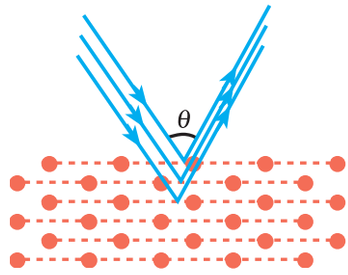
$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \text{ja} \quad E = hf,$$

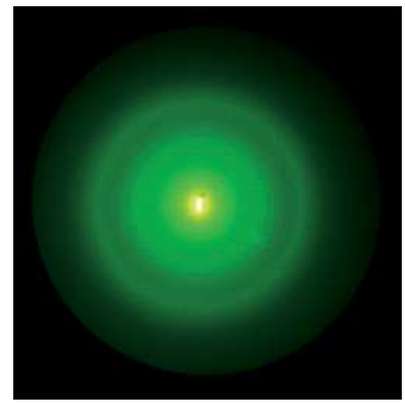
joissa h on Planckin vakio, f säteilyn taajuus ja λ sen aallonpituus, E hiukkasen energia ja p liikemäärä.
Suureet liikemäärä ja energia (p ja E) liittyvät hiukkasiin, taajuus ja aallonpituus (f ja λ) aaltoihin.



De Broglien aallot tukevat Bohrin atomimallin ennustusta elektronin liikeratojen kvantittumisesta. Voidaan ajatella, että vain sellaiset radat ovat mahdollisia, joille mahtuu seisova elektronin aalto. Silloin elektronin radan pituuden tulee olla de Broglien aallon aallonpituuden kokonainen monikerta eli $2\pi r_n = n\lambda_n$ ja $\lambda_n = \frac{h}{mv_n}$. Tämä selittää atomin sallitut (stationaariset) tilat, sillä seisova aaltoliike ei lähetä energiaa ympäristöön. Klassinen fysiikka ei pystynyt selittämään atomin stationaarisia tiloja.







De Broglien aineaaltohypoteesi sai kokeellisen vahvistuksen vuonna 1927. *Clinton Davisson* (1881–1958) ja *Lester Germer* (1896–1971) tutkivat nikkeliä pommittamalla sitä elektroneilla. He mittasivat nikkelistä sironneiden elektronien intensiteettiä sirontakulman funktiona. Sironneet elektronit muodostivat ilmaisimelle samanlaisen interferenssikuvion kuin röntgensäteily: kuviossa havaittiin useita intensiteettimaksimeja.

Davisson ja Germer oivalsivat, että maksimit johtuivat elektronisuihkun diffraktiosta: tämä oli osoitus elektronien aaltoluonteesta. He myös määrittivät elektroneille de Broglien aaltojen aallonpituuden. Davisson sai havainnoistaan fysiikan Nobelin palkinnon J. G. Thomsonin kanssa.

Esimerkki 8

Elektroneja kiihdytetään 1,5 kV:n jännitteellä. Laske elektronien de Broglien aallon aallonpituus.

$m = 9{,}1093897 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}, \quad U = 1{,}5\ \text{kV},$
$h = 6{,}6260755 \cdot 10^{-34}\ \text{Js}, \quad q = |-e| = 1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \text{C}$

Elektroneihin vaikuttavan sähköisen voiman tekemä työ on yhtä suuri kuin elektronin potentiaalienergian muutos: $W = qU$, jossa q on elektronin varauksen itseisarvo. Kiihdytyksessä potentiaalienergia muuntuu elektronin liike-energiaksi $E_\text{k} = \frac{1}{2}mv^2$. Saadaan yhtälö $qU = \frac{1}{2}mv^2$, josta elektronin nopeus on $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$. Sijoitetaan nopeuden yhtälö de Broglien aallon aallonpituuden yhtälöön. Aallonpituus on

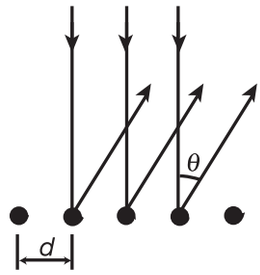
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m\sqrt{\frac{2qU}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{2mqU}}$$

$$= \frac{6{,}6260755 \cdot 10^{-34}\ \text{Js}}{\sqrt{2 \cdot 9{,}1093897 \cdot 10^{-31}\ \text{kg} \cdot 1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 1{,}5\ \text{kV}}}$$

$$\approx 32\ \text{pm}.$$

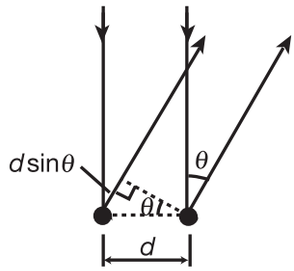
Elektronien de Broglien aallon aallonpituus on 32 pm.

Esimerkki 9



Matalaenergiaisten elektronien diffraktiokokeessa (LEED) elektronisuihku osuu kohtisuorasti piikiteen pintaan. Vierekkäisistä pinta-atomeista täysin kimmoisasti sironneessa elektronisuihkussa havaitaan ensimmäisen kertaluvun intensiteettimaksimi 21°:n kulmassa (θ) pinnan normaaliin nähden. Laske vierekkäisten pinta-atomien välinen etäisyys (d), kun tulevan suihkun elektronien energia on 79 eV. [S2002, 12]

$\theta = 21°$, $E = 79$ eV, $m = 9{,}1093897 \cdot 10^{-31}$ kg,
$h = 6{,}6260755 \cdot 10^{-34}$ Js, $k = 1$, 1 eV = 0,16021773 aJ



Matalaenergiaisten elektronien liike-energia on $E_\mathrm{k} = \frac{1}{2}mv^2$, josta elektronien nopeus on $v = \sqrt{\frac{2E_\mathrm{k}}{m}}$. Koska elektronit diffraktoituvat metallihilassa, ne käyttäytyvät kuten aallot. Vierekkäisistä pinta-atomeista sironneiden elektronisuihkujen matkaero on $d\sin\theta$. Elektronisuihkut vahvistavat toisiaan, kun $d\sin\theta = k\lambda$. Elektronien de Broglien aaltojen aallonpituus on $\lambda = \frac{h}{mv}$.

Yhtälöstä $d\sin\theta = k\frac{h}{mv}$ saadaan atomien väliseksi etäisyydeksi

$$d = \frac{kh}{mv\sin\theta} = \frac{kh}{m\sqrt{\frac{2E_\mathrm{k}}{m}}\cdot\sin\theta}$$

$$= \frac{1\cdot 6{,}6260755\cdot 10^{-34}\ \mathrm{Js}}{9{,}1093897\cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg}\cdot\sqrt{\frac{2\cdot 79\cdot 0{,}16021773\ \mathrm{aJ}}{9{,}1093897\cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg}}}\cdot\sin 21°}$$

$$\approx 0{,}39\ \mathrm{nm}.$$

Pinta-atomien välinen etäisyys on 0,39 nm.

Pohdi ja etsi

1-30. Jos protonilla ja elektronilla on sama nopeus, ovatko niiden de Broglien aallon aallonpituudet yhtä suuret?

1-31. Miten hiukkasia ja aaltoja on käsitelty klassisessa fysiikassa? Pohdi, kuinka aalloilla ja hiukkasilla voidaan mallintaa
a) valon b) elektronien ominaisuuksia.

1-32. Miten elektronien de Broglien aallon aallonpituus muuttuu, jos elektronien liike-energia kasvaa?

1-33. Selitä, mitä tarkoitetaan valon duaalisella mallilla.

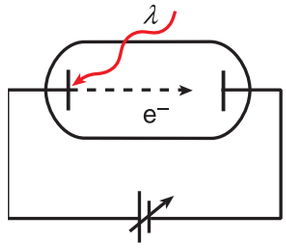
1-34. Mitkä seuraavista väitteistä pitävät paikkansa?
a) Valon taittuminen voidaan selittää valon aaltomallin avulla.
b) Valon taittuminen voidaan selittää valon hiukkasmallin avulla.
c) Valosähköinen ilmiö selitetään valon hiukkasmallin avulla.
d) Elektronien aaltoluonne on vahvistettu kokeellisesti.

Tehtäviä

1-35. Protoni liikkuu nopeudella $1{,}0 \cdot 10^6$ m/s. Laske protonin de Broglien aallon aallonpituus.

1-36. Elektronin liike-energia on 150 eV. Laske elektronin de Broglien aallon aallonpituus.

1-37. Kun valo, jonka aallonpituus on 611 nm, osuu valokennoon, tarvitaan 0,31 V:n pysäytysjännite estämään irronneiden elektronien pääsy anodille (kuva).
a) Laske katodilta irtoavien elektronien de Broglien aallon aallonpituus.
b) Kuinka suuri pysäytysjännite tarvitaan, kun käytetään valoa, jonka aallonpituus on 489 nm?

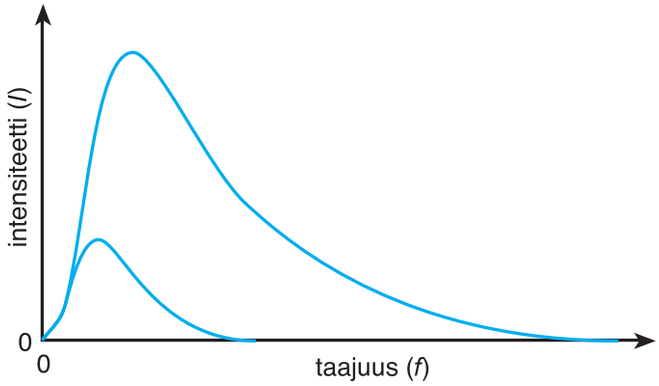


Testaa, osaatko

Oikeita vastausvaihtoehtoja voi olla yksi tai useampia.

1. Mitkä seuraavista väitteistä ovat totta?
a) Noenmusta kappale ei säteile sähkömagneettista säteilyä.
b) Aurinko voi absorboida sähkömagneettista säteilyä säteilyn aallonpituudesta riippumatta.
c) Kuumennettaessa tumma kappale alkaa hehkua punaisena matalammassa lämpötilassa kuin vaalea kappale.

2. Kuvassa on kahden mustan kappaleen säteilyn intensiteetti taajuuden f funktiona. Mitkä seuraavista väitteistä ovat totta?
a) Matalampi spektri vastaa kuumempaa kappaletta.
b) Korkeampi spektri vastaa kuumempaa kappaletta.
c) Säteilyjen lämpötilat riippuvat taajuudesta.



3. Valosähköisessä ilmiössä irronneen fotoelektronin suurin mahdollinen liike-energia riippuu käytetyn valon
a) taajuudesta
b) intensiteetistä
c) aallonpituudesta.

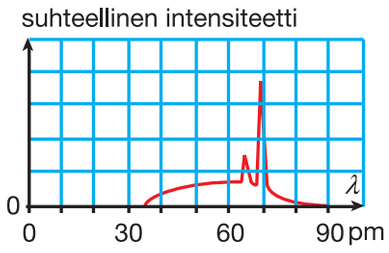
4. Valon aallonpituus on 550 nm. Se pystyy juuri ja juuri irrottamaan elektronin metallin pinnasta. Irrotustyö on
a) 2,3 J b) 2,3 keV c) 2,3 eV.

5. Mitkä seuraavista väitteistä ovat totta?
a) Sähkömagneettinen säteily koostuu kvanteista ja etenee valon nopeudella.
b) Fotonin liikemäärä voi olla nolla.
c) Comptonin sironnassa fotonin taajuus kasvaa.

6. Comptonin sironta osoittaa, että
a) valolla on hiukkasluonne
b) valolla on aaltoluonne
c) fotonin energia voi muuttua.

7. Mitkä vaihtoehdoista pitävät paikkansa?
a) Elektronien jarruuntumisesta aiheutuvaa säteilyä kutsutaan röntgenputken jarrutussäteilyksi.
b) Ominaissäteilyn aallonpituudet riippuvat röntgenputken anodiaineesta.
c) Röntgensäteily on pitkäaaltoista sähkömagneettista säteilyä.

8. Kuvaajassa olevan röntgenspektrin perusteella voidaan päätellä, että
a) jarrutussäteilyn aallonpituuden alaraja on 35 pm
b) anodiin törmäävien elektronien energia on 35 keV
c) ominaissäteilyn K_α-piikin aallonpituus on 63 pm.



Tiivistelmä

- Planckin kvanttihypoteesi
  – Aine luovuttaa ja ottaa vastaan säteilyä vain tietynsuuruisina energia-annoksina eli kvantteina.
  – Kvantin energia on $E = hf$, jossa f on säteilyn taajuus ja h Planckin vakio.

- Einsteinin valon kvanttiteorian mukaan sähkömagneettinen säteily koostuu kvanteista. Sähkömagneettisen säteilyn kvantteja kutsutaan fotoneiksi. Fotonin nopeus on valon nopeus. Fotoni on massaton ja sähköisesti neutraali hiukkanen.

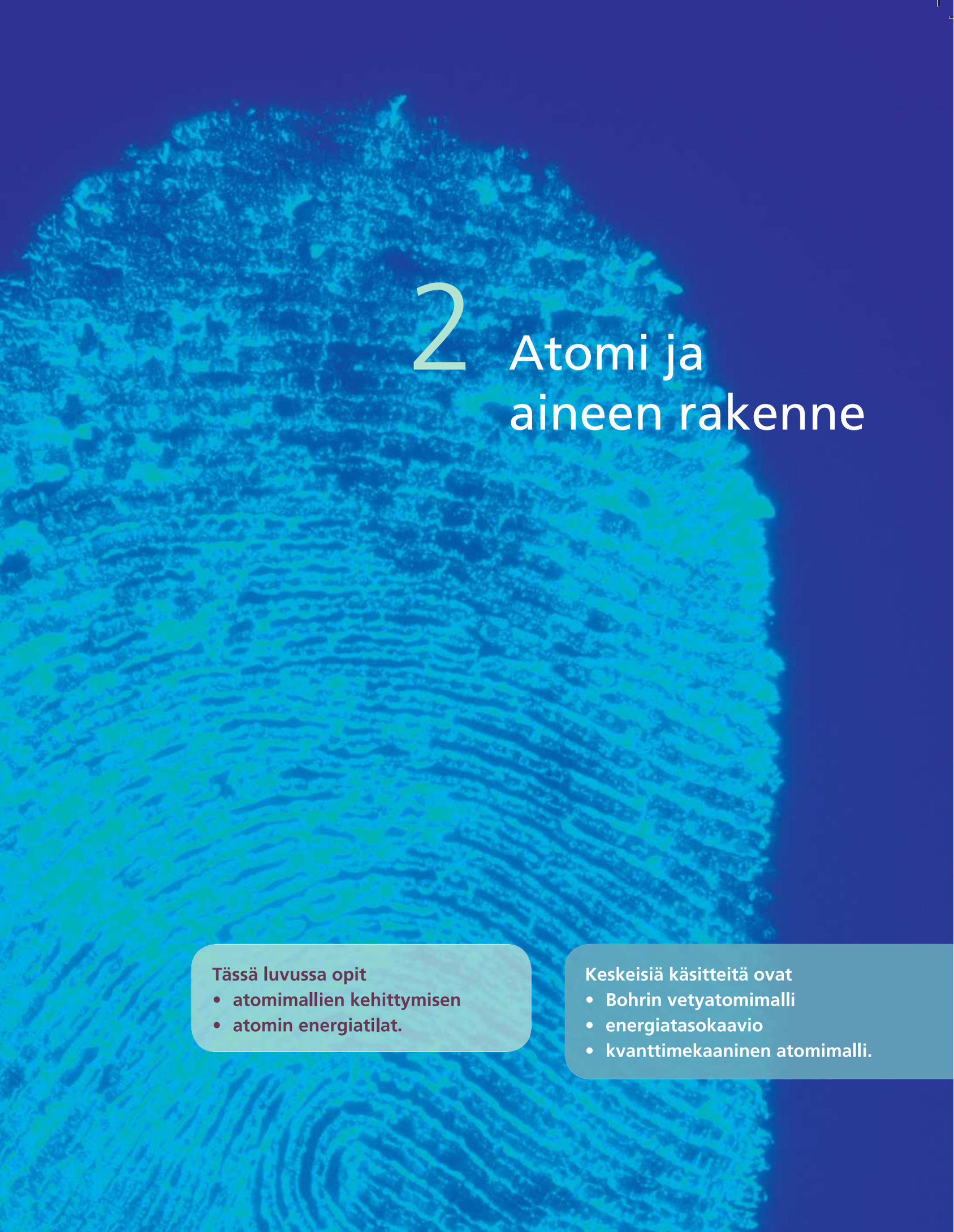
- Fotonin liikemäärä on $p = \frac{h}{\lambda}$, jossa λ on sähkömagneettisen aaltoliikkeen aallonpituus ja h Planckin vakio.

- Valosähköisessä ilmiössä säteilyn ja elektronin vuorovaikutuksessa osa säteilykvantin energiasta hf kuluu elektronin irrottamiseen metallista ja loppu muuntuu elektronin kineettiseksi energiaksi:
  $E_k^{max} = hf - W_0$, jossa W_0 on irrotustyö ja E_k^{max} irronneen elektronin suurin mahdollinen liike-energia.

- Comptonin ilmiö ja valosähköinen ilmiö osoittavat sähkömagneettisen säteilyn hiukkasluonteen. Polarisaatio, diffraktio ja interferenssi osoittavat valon aaltoluonteen.

- Röntgensäteily on lyhytaaltoista sähkömagneettista säteilyä. Sitä syntyy, kun elektronisuihku osuu metallikohtioon. Jarrutussäteilyssä elektronin liike-energia muuntuu osittain tai kokonaan säteilyn kvantin energiaksi. Röntgenputken ominaissäteilyn aallonpituudet riippuvat röntgenputken anodiaineesta, sen atomien elektroniverhon rakenteista ja energioista.

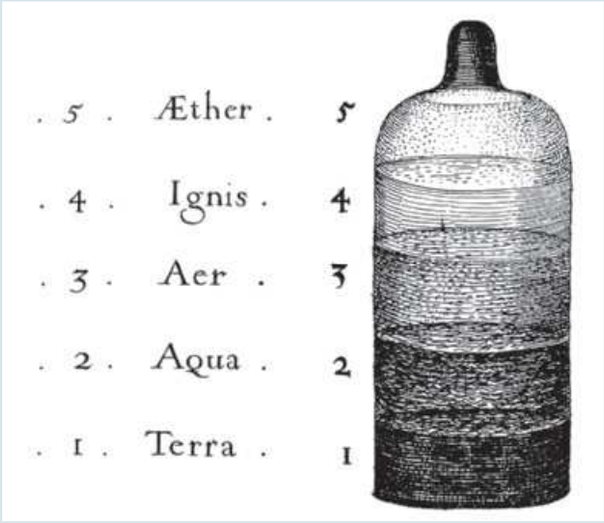
- Aaltohiukkasdualismin mukaan kaikilla hiukkasilla ja säteilyn lajeilla esiintyy sekä hiukkasille että aalloille ominaisia piirteitä. Niitä yhdistävät de Broglien lait $p = \frac{h}{\lambda}$ ja $E = hf$, joissa E on hiukkasen energia ja p liikemäärä. Suureet p ja E liittyvät hiukkasiin, f ja λ aaltoihin.



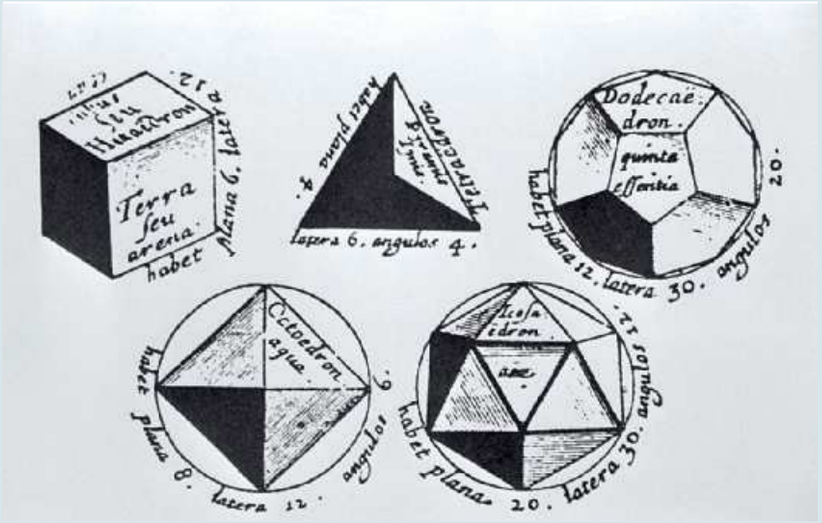
2 Atomi ja aineen rakenne

Tässä luvussa opit
- **atomimallien kehittymisen**
- **atomin energiatilat.**

Keskeisiä käsitteitä ovat
- **Bohrin vetyatomimalli**
- **energiatasokaavio**
- **kvanttimekaaninen atomimalli.**



Daltonin symboleja atomeille ja molekyyleille.



Viisi Platonin kappaletta.

Aavistus atomista

Kreikkalaista filosofia *Leukipposta* (s. n. 490 eKr.) pidetään atomi-käsitteen luojana. Hänen oppilaansa *Demokritos* (n. 470 eKr. – n. 380 eKr.) jatkoi atomiopin kehittämistä. Heidän mielestään kappaletta yhä pienempiin osiin jaettaessa päädytään lopulta hiukkasiin, joita ei voida jakaa. He kutsuivat näitä hiukkasia nimellä *atomos* 'jakamaton'.

Empedokleen (492–432 eKr.) mukaan kaikki rakentui neljää ainetta — vettä, ilmaa, tulta ja maata — sopivasti yhdistämällä. Platon (427–347 eKr.) esittelee teoksessa Timaios eri alkuaineiden atomeja. Hänen mukaansa maa on alkuaine, jonka atomit ovat kuution muotoisia. Maa on alkuaineista liikkumattomin, ja kuutio on muodoltaan tukevin rakenne. Tuli on alkuaineista liikkuvin, kevein ja teräväkärkisin, joten sen atomin muoto on pyramidi.

Aristoteles (384–322 eKr.) lisäsi maailmaneetterin avaruuden rakennusaineeksi. *Demokritoksen* mukaan veden atomit olivat pyöreitä ja sileitä, koska vesi otti astian muodon, ja tulen atomit olivat piikkisiä, koska ne kirvelivät ihoa. Maan atomit olivat niin epätasaisia ja rosoisia, että ne pystyivät muodostamaan kiinteää ainetta. Aristoteleen mielestä tyhjiötä ei voinut olla olemassa, joten hän hylkäsi Demokritoksen atomiteorian – jos aine koostuisi atomeista, niiden väliin jäisi välttämättä tyhjää.

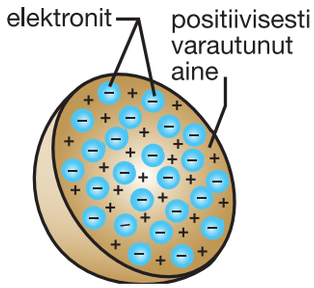
1800-luvulta lähtien on määrätietoisesti pyritty selvittämään atomin rakennetta ja ominaisuuksia. Kokeellisten tietojen karttuessa atomimallia on muutettu ja kehitetty kuvaamaan paremmin todellisuutta.

Ensimmäisenä kokeellisiin tosiasioihin perustuvan atomimallin luojana pidetään englantilaista kemistiä *John Daltonia* (1766–1844). Hän huomasi vuonna 1804, että tietty kemiallinen yhdiste sisältää aina samoja alkuaineita samoissa massasuhteissa. Hän päätteli, että kukin alkuaine koostuu atomeista, jotka ovat keskenään samanlaisia ja jakamattomia.

2.1 Varhaiset atomimallit

Thomsonin atomimalli

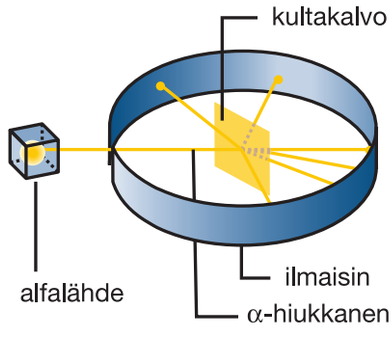
Sir *Joseph Thomson* (1856–1940) havaitsi vuonna 1897 katodisädeputkikokeissaan varatun hiukkasen, jota hän kutsui korpuskeliksi. Nimi elektroni otettiin käyttöön myöhemmin. Vuonna 1904 hän esitti myös ensimmäisen atomin rakennetta kuvaavan atomimallin.

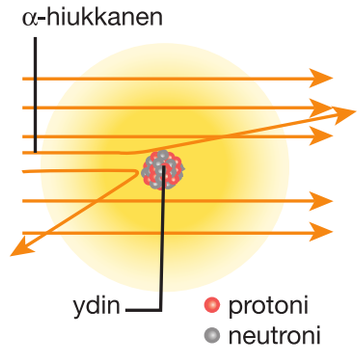


Thomsonin atomimallissa positiivinen varaus oli jakautunut koko atomin alueelle. Atomi oli positiivisesti varautunut kimmoisa pallo, jonka sisällä olivat negatiivisesti varautuneet elektronit. Atomi oli ulospäin sähköisesti neutraali. Mallia nimitetään ”rusinakakkumalliksi”, koska elektronit ovat mallin atomissa kuin rusinat kakussa.

Rutherfordin atomimalli

Uusiseelantilainen fyysikko *Ernest Rutherford* (1871–1937) osoitti, että 1800-luvun lopussa havaittu ionisoiva säteily sisältää heliumioneja (He^{2+}), joiden sähkövaraus on $+2e$. Tätä radioaktiivisuuden lajia kutsutaan alfasäteilyksi (α-säteily). Rutherford päätti tutkia aineen rakennetta α-säteilyn avulla. Hänen lähtökohtanaan oli päätellä tutkittavan kohteen rakenne niistä muutoksista, joita aine aiheuttaa alfahiukkasten liikeratoihin. Tällaista liikeratojen muutoksiin perustuvaa koetta kutsutaan sirontakokeeksi.





Rutherford osoitti vuonna 1911 sirontakokeellaan atomin ytimen olemassaolon. Hän sijoitti lyijykoteloon radiumia, joka lähettää α-hiukkasia, ja ohjasi α-hiukkaset törmäämään ohueen kultakalvoon. Kultakalvosta sironneet α-hiukkaset havaittiin säteilyilmaisimella. Rutherford odotti, että raskaiden α-hiukkasten liikesuunnat muuttuisivat vain vähän niiden törmäillessä Thomsonin atomimallin mukaiseen ”tasaiseen” aineeseen ja siinä oleviin kevyihin elektroneihin. Suuri yllätys oli, että muutamat α-hiukkaset kimposivat takaisin tulosuuntaansa.

Rutherfordin sirontakokeet osoittivat Thomsonin atomimallin mahdottomaksi. Kokeen perusteella atomin massan täytyy olla keskittyneenä pieneen tilaan, ytimeen, jolla on positiivinen varaus. Näin syntyi ajatus atomiytimestä. Rutherfordin mallin mukaan atomeilla on pienikokoinen, positiivisesti varautunut ydin, jota negatiivisesti varautuneet elektronit kiertävät. Atomin massa on keskittynyt lähes kokonaan atomin ytimeen.

Rutherfordin tutkimusten mukaan atomin halkaisijan suuruusluokka on 10^{-10} m ja ytimen 10^{-14} m. Ne α-hiukkaset, jotka ohittivat kultaytimet etäältä, läpäisivät kultakalvon kuin edessä ei olisi ollut mitään. Läheltä ydintä kulkeneet α-hiukkaset olivat vuorovaikutuksessa ytimen kanssa ja muuttivat kulkusuuntaansa, jotkut jopa vastakkaiseksi.

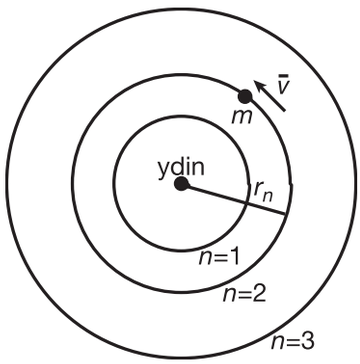
Rutherfordin atomimalli muistuttaa rakenteeltaan planeettajärjestelmää. Coulombin lain mukainen sähköinen vetovoima pitää elektronit radoillaan ytimen lähellä. Malliin johtaneet mittaustulokset ovat osoittautuneet paikkansapitäviksi, mutta atomimalli on puutteellinen.

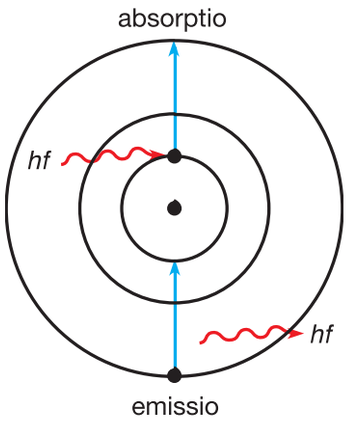
Ydintä kiertävä elektroni on kiihtyvässä liikkeessä, koska sen liikkeen suunta muuttuu koko ajan. Sen pitäisi silloin lähettää energiaa sähkömagneettisena säteilynä, ja elektronin radan tulisi energian menetyksen takia olla ytimeen päättyvä spiraali. Klassisen fysiikan mukaan elektroni ei siis pysyisi ympyräradallaan ytimen ympärillä eikä atomi olisi pysyvä. Atomin rakenteen ymmärtämiseksi tarvittiin Rutherfordin mallia syvällisempää tietoa. Sitä vaadittiin myös atomien lähettämän sähkömagneettisen säteilyn spektrien selittämiseksi.

Bohrin malli vetyatomille

Tanskalainen *Niels Bohr* (1885–1962) yhdisti Rutherfordin sirontakokeen tulokset ja Planckin ajatuksen energian kvantittumisesta. Vuonna 1913 Bohr esitti atomimallinsa, josta alkoi nykyaikaisen atomimallin kehitys. Bohrin vetyatomimalli oli yksi keskeisimmistä oivalluksista atomin rakenteen tutkimuksessa. Mallin oletus oli, että elektroni kiertää ydintä ympyrärataa pitkin mutta ei – vastoin klassisen fysiikan lakeja – säteile sähkömagneettista säteilyä. Elektronilla on atomissa useita mahdollisia kiertoratoja, ja kullakin radalla elektronin energialla on tietty vakioarvo. Näitä kutsutaan energiatiloiksi.

Bohrin vetyatomimallin **perustana** on **kvanttiteoria**, jonka mukaan atomi lähettää ja vastaanottaa säteilyenergiaa kvantteina.





Bohrin vetyatomimallin oletukset

- Elektroni kiertää pientä positiivisesti varattua ydintä ympyrärataa pitkin.
- Elektronin ympyräliikkeen aiheuttaa Coulombin lain mukainen ytimen ja elektronin välinen sähköinen vetovoima.
- Elektronin liikeyhtälö on $\Sigma\bar{F} = m\bar{a}_\mathrm{n}$ eli $k\dfrac{e^2}{r^2} = \dfrac{mv^2}{r}$.
- Elektroni voi liikkua vain tiettyjä erisäteisiä ratoja pitkin. Elektronin energia ei muutu elektronin ollessa sallitulla radalla, eikä atomi silloin lähetä sähkömagneettista säteilyä. Pääkvanttiluku n ilmoittaa, mikä rata ytimestä lähtien on kyseessä.
- Kun atomi siirtyy sallitulta radalta eli energiatilalta toiselle, atomi emittoi tai absorboi energiakvantin, fotonin. Kvantin energia on eri tiloja vastaavien elektronin kokonaisenergioiden erotus eli $E = hf = E_m - E_n$, jossa h on Planckin vakio ja f säteilyn taajuus.

Bohrin mallissa kvantittuminen on mukana siten, että vain tietyt atomin tilat ovat mahdollisia. *Arnold Sommerfeld* (1868–1951) laajensi Bohrin teoriaa ellipsiratoihin. Hän osoitti, että ellipsiradoilla on samat energiat kuin ympyräradoilla mutta kutakin energiatilaa vastaa tietty määrä erimuotoisia ratoja.

Bohrin mallin avulla voidaan selittää vain vetyatomin tai sen kaltaisen yksielektronisen ionin (He^+, Li^{2+}) rakenne. Monielektronisten atomien spektrejä ja elektroniverhojen rakenteita se ei selitä. Tarkat spektritutkimukset ovat osoittaneet spektriviivojen ”hienorakenteen”: atomissa on enemmän sallittuja ratoja kuin Bohrin malli ennustaa. Bohrin malli ei selitä spektriviivojen intensiteettejä eikä yksinkertaisenkaan molekyylin, esimerkiksi H_2:n, muodostumista. Puutteistaan huolimatta Bohrin vetyatomimalli oli merkittävä edistysaskel aineen rakenteen selvittämisessä.

Pohdi ja etsi

2-1. Miten seuraavat henkilöt liittyvät atomin mallin kehittymiseen?

a) Demokritos
b) John Dalton
c) Joseph J. Thomson
d) Ernest Rutherford
e) Niels Bohr
f) James Chadwick

2-2. a) Kuvaile Thomsonin atomimallin rakennetta.
b) Miksi Rutherford oletti, että α-hiukkanen menisi suoraviivaisesti Thomsonin atomimallin mukaisen atomin läpi?
c) Miksi Rutherfordin atomimallin mukainen atomi ei voi olla rakenteeltaan pysyvä?

2-3. Selitä, miten Rutherford osoitti kokeellisesti atomin ytimen olemassaolon.

2-4. Mitkä ovat Bohrin vetyatomimallin keskeiset oletukset? [S2001, 9 (osa)]

2-5. Miksi Bohrin vetyatomi osoittautui puutteelliseksi?

2-6. Selvitä atomimallien kehitystä lähtien varhaisista atomimalleista ja päätyen Bohrin vetyatomimalliin.

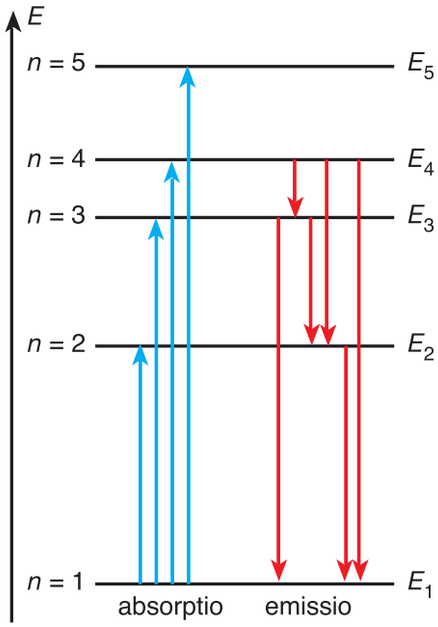
2-7. Yhdistä henkilö ja tapahtuma/ilmiö toisiinsa. Ilmoita vastauksena kirjaimen ja numeron yhdistelmä.

A Niels Bohr
B Ernest Rutherford
C Leukippos
D John Dalton
E Joseph J. Thomson
F Arnold Sommerfeld

1. ytimen olemassaolo
2. kvantti
3. elektronin ellipsirata
4. atomin käsite
5. ensimmäinen kokeellinen atomimalli
6. korpuskeli

2.2 Atomin energiatilat

Energiatasokaavio



Atomin energiatasokaavio.

Atomin elektroneilla on kullakin tietty kokonaisenergia, joka riippuu siitä, millä etäisyydellä ytimestä elektroni liikkuu. Atomin energia on kvantittunut. Atomin energiatiloja kuvataan **energiatasokaaviolla**. Huomaa, että atomin energiatiloilla tarkoitetaan kuitenkin aina elektronien energiatiloja.

Pääkvanttiluku n ilmoittaa, mikä elektronin energiatila on kyseessä. Energiatasokaavioon merkitään eri pääkvanttiluvun arvoja vastaavat energiat. On sovittu, että elektronin (potentiaali)energia atomissa on negatiivinen. Siksi atomin energiatilojen energiat ilmoitetaan aina **negatiivisina**.

Atomin perustila ja viritystila
Tilaa, jossa atomin kokonaisenergia on pienin, kutsutaan atomin perustilaksi. Muita tiloja kutsutaan viritystiloiksi.

Esimerkiksi yksielektronisen atomin kokonaisenergia on pienin, kun elektroni on pääkvanttilukua $n = 1$ vastaavalla energiatilalla.

Kun elektroni siirtyy alemmalta energiatilalta ylemmälle, atomi **absorboi** energiaa: tällöin atomi **virittyy**. Elektronin siirtymisen voi aiheuttaa säteilykvantti (tai törmäyksessä saatu energia). Jotta elektroni voi siirtyä alemmalta energiatilalta ylemmälle energiatilalle, on säteilykvantin energian oltava näiden energiatilojen energioiden erotus. Atomi voi siis absorboida energiaa vain tietynsuuruisina kvantteina. Atomien virittämiseen tarvittavien energioiden suuruudet ovat kullekin atomille ominaiset, ja jokaisella atomilla on useita viritysenergioita.

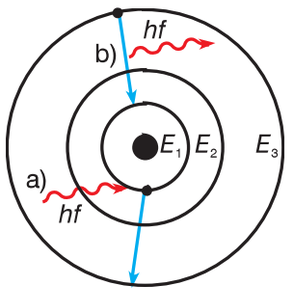
Atomin viritystilat ovat hyvin lyhytikäisiä. Viritystilan purkautuessa atomi siirtyy korkeammasta energiatilasta alempaan ja atomi **emittoi** fotonin. Fotonin energia on energiatilojen energioiden erotus. Viritystilan purkautuminen tapahtuu yleensä itsestään eli spontaanisti.

Energiatasokaaviossa virittymistä kuvataan ylöspäin ja viritystilan purkautumista alaspäin suuntautuvilla nuolilla.

Kvantin energia
Atomi voi emittoida tai absorboida kvantin (fotonin), jonka energia on

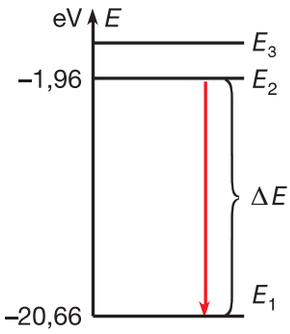
$$hf = E_m - E_n,$$

jossa h on Planckin vakio ja f kvantin taajuus. E_m ja E_n ovat energiatilojen m ja n energiat ($m > n$).



Viereisessä kuvassa esitetään elektronin siirtymä (a) atomin absorboidessa säteilykvantin ja (b) atomin emittoidessa säteilykvantin. Kvantin energia on $hf = E_3 - E_1$.

Esimerkki 1



Kuvassa on erään atomin alimpien energiatilojen energiatasokaavio. Elektroni siirtyy energiatilalta E_2 tilalle E_1. Laske siirtymässä emittoituvan säteilykvantin aallonpituus.

$E_1 = -20{,}66$ eV, $\quad E_2 = -1{,}96$ eV
$h = 4{,}135669 \cdot 10^{-15}$ eVs, $\quad c = 2{,}99792458 \cdot 10^8$ m/s

Energiatilojen erotus on

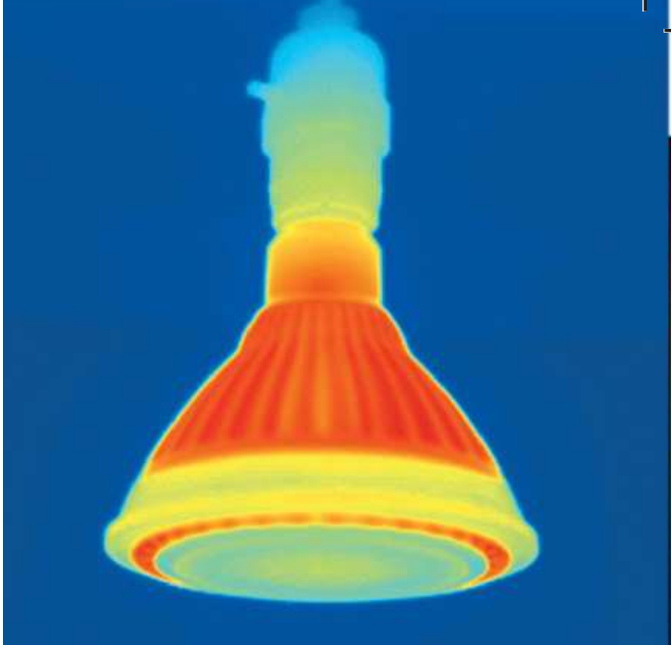
$$\Delta E = E_2 - E_1 = -1{,}96 \text{ eV} - (-20{,}66 \text{ eV}) = 18{,}7 \text{ eV}.$$

Tämä on yhtä suuri kuin viritystilan purkautuessa syntyvän kvantin energia eli $\Delta E = hf = \dfrac{hc}{\lambda}$.

Aallonpituus on

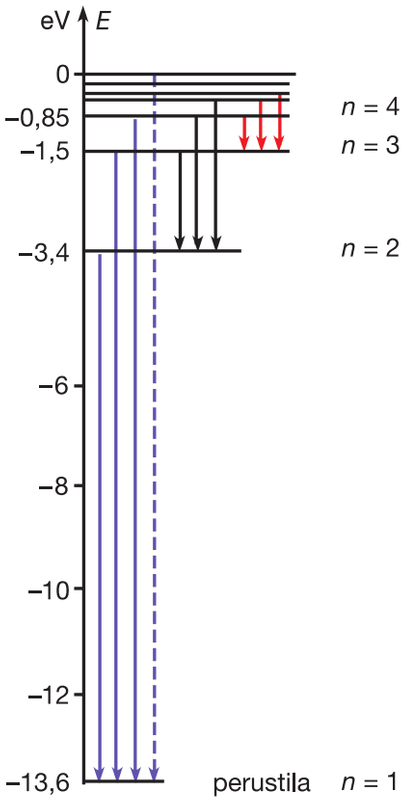
$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{4{,}135669 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 2{,}99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{18{,}7 \text{ eV}}$$
$$\approx 66{,}3 \text{ nm}.$$

Säteilykvantin aallonpituus on 66,3 nm.



Led on puolijohdediodi, jossa valo syntyy p- ja n-tyypin puolijohteiden rajapinnassa. Kun ledin läpi johdetaan sähkövirta, elektronit siirtyvät n-puolelta rajapinnan yli p-puolen aukkoihin ja alempaan energiatilaan. Tällöin led emittoi valoa, jota voidaan muokata pinnoitteilla ja kalvoilla. Led-valaisimet ovat syrjäyttämässä pienoisloisteputket (energiansäästölamput).

Vetyatomin energiatilat



Vetyatomin energiatasokaavio.

Bohrin vetyatomimallin mukaan elektroni voi olla vain tietyillä energiatiloilla. Vetyatomin perustilan ja viritystilojen energiat voidaan laskea yhtälöstä $E_n = -\frac{13{,}6}{n^2}$ eV (ks. tehtävä 3-13). Yhtälöstä nähdään, että vetyatomin energia on pienin perustilassa $n = 1$.

Vetyatomin energiatilat

Vetyatomin pysyvien (stationääristen) tilojen energiat saadaan yhtälöstä

$$E_n = -\frac{13{,}6}{n^2}\ \text{eV},$$

jossa $n = 1, 2, 3, \ldots$

Vetyatomi on perustilassa, kun sen energia on pienin mahdollinen eli $n = 1$.

Vetyatomin energiatilat ovat kvantittuneet.

Vetyatomin perustilan energia on −13,6 eV. Elektronin irrottamiseen perustilassa olevasta vetyatomista tarvitaan vähintään 13,6 eV:n suuruinen energia. Tätä energiaa sanotaan vetyatomin **ionisointienergiaksi**.

Esimerkki 2

Fotoni törmää perustilassa olevaan vetyatomiin. Päättele, mitä vetyatomille tapahtuu, kun fotonin energia on
a) 12,1 eV b) 10,0 eV c) 13,8 eV.

a) Energia 12,1 eV on sama kuin vetyatomin energiatilojen 3 ja 1 välinen energiaero:

$$\Delta E = E_3 - E_1 = -1{,}5\ \text{eV} - (-13{,}6\ \text{eV}) = 12{,}1\ \text{eV}.$$

Näin ollen fotoni virittää vetyatomin, ja elektroni siirtyy energiatasolle $n = 3$.

b) Jos fotonin energia on 10,0 eV, fotoni ei pysty virittämään vetyatomia, koska mikään energiatilojen välinen energia ei ole tämän suuruinen. Näin ollen fotoni ei absorboidu vetyatomiin.

c) Jos fotonin energia on 13,8 eV, fotoni pystyy ionisoimaan vetyatomin. Fotonin energiasta 13,6 eV menee vedyn ionisointiin ja loput eli 0,2 eV jää atomista irronneen elektronin liike-energiaksi.

Esimerkki 3

Perustilassa oleva vetyatomi virittyy kvanttilukua $n = 4$ vastaavaan energiatilaan. Tämän viritystilan purkautuessa voi emittoitua fotoneja, joiden aallonpituus on näkyvän valon alueella. Määritä nämä aallonpituudet ja piirrä energiatasokaavio, johon on merkitty kyseisiä aallonpituuksia vastaavat siirtymät.

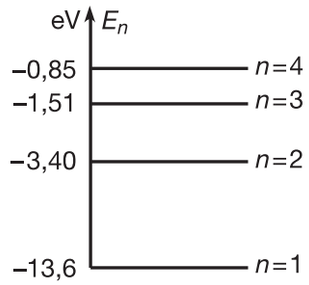
Lasketaan energiatasokaavion piirtämistä varten vetyatomin energiatilat E_n pääkvanttiluvun n arvoilla 1, 2, 3 ja 4:

$$n = 1\text{: } E_1 = -13{,}6\ \text{eV}$$

$$n = 2\text{: } E_2 = -\frac{13{,}6\ \text{eV}}{2^2} \approx -3{,}40\ \text{eV}$$

$$n = 3\text{: } E_3 = -\frac{13{,}6\ \text{eV}}{3^2} \approx -1{,}51\ \text{eV}$$

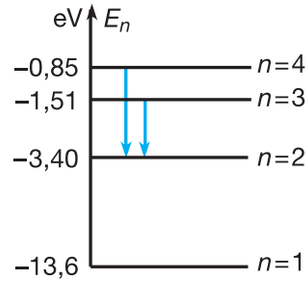
$$n = 4\text{: } E_4 = -\frac{13{,}6\ \text{eV}}{4^2} \approx -0{,}85\ \text{eV}$$



Koska $\Delta E = hf = \frac{hc}{\lambda}$, siirtymän aallonpituus saadaan yhtälöstä $\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$. Mahdolliset siirtymät ja niitä vastaavat aallonpituudet ovat seuraavat:

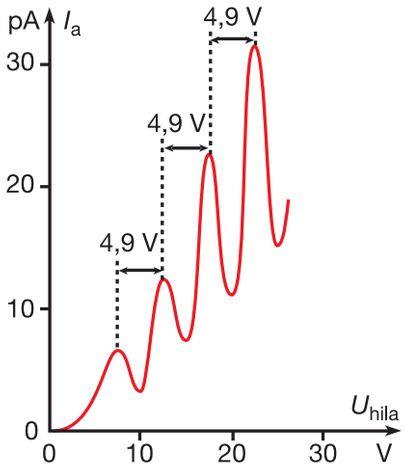
Siirtymä	Aallonpituus λ	Valon väri
$4 \rightarrow 3$	$\lambda = \frac{4{,}135669 \cdot 10^{-15}\ \text{eVs} \cdot 2{,}99792458 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{-0{,}85\ \text{eV} - (-1{,}51\ \text{eV})} \approx 1880\ \text{nm}$	ei näkyvää valoa
$4 \rightarrow 2$	$\lambda = \frac{4{,}135669 \cdot 10^{-15}\ \text{eVs} \cdot 2{,}99792458 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{-0{,}85\ \text{eV} - (-3{,}40\ \text{eV})} \approx 486\ \text{nm}$	sininen
$4 \rightarrow 1$	$\lambda = \frac{4{,}135669 \cdot 10^{-15}\ \text{eVs} \cdot 2{,}99792458 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{-0{,}85\ \text{eV} - (-13{,}6\ \text{eV})} \approx 97{,}3\ \text{nm}$	ei näkyvää valoa
$3 \rightarrow 2$	$\lambda = \frac{4{,}135669 \cdot 10^{-15}\ \text{eVs} \cdot 2{,}99792458 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{-1{,}51\ \text{eV} - (-3{,}40\ \text{eV})} \approx 656\ \text{nm}$	punainen
$3 \rightarrow 1$	$\lambda = \frac{4{,}135669 \cdot 10^{-15}\ \text{eVs} \cdot 2{,}99792458 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{-1{,}51\ \text{eV} - (-13{,}6\ \text{eV})} \approx 102{,}6\ \text{nm}$	ei näkyvää valoa
$2 \rightarrow 1$	$\lambda = \frac{4{,}135669 \cdot 10^{-15}\ \text{eVs} \cdot 2{,}99792458 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{-3{,}40\ \text{eV} - (-13{,}6\ \text{eV})} \approx 122\ \text{nm}$	ei näkyvää valoa

Oheiseen energiatasokaavioon on merkitty näkyvän valon aallonpituusalueella olevat siirtymät.



Näkyvän valon alueella emittoituneiden fotonien aallonpituudet ovat 486 nm ja 656 nm.

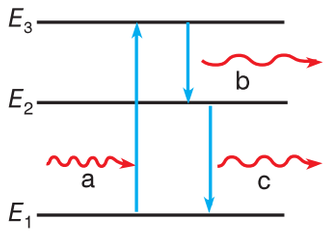
Yhdysvaltalainen *James Franck* (1882–1964) ja saksalainen *Gustav Hertz* (1887–1975) osoittivat kokeellisesti vuonna 1914, että atomi ottaa energiaa vastaan vain tietynsuuruisina kvantteina. Franck ja Hertz käyttivät kokeessaan kolmielektrodista purkausputkea, jossa oli pienipaineista elohopeahöyryä. Kun purkausputkessa elektronien kiihdytysjännite kasvaa, putken anodivirta muuttuu. Kun kiihdytysjännite on tarpeeksi suuri, elektronit saavat riittävästi liike-energiaa elohopea-atomin virittämiseen. Törmätessään elohopea-atomiin elektroni menettää energiaansa atomin elektronille, joka siirtyy viritystilalle. Elohopea-atomin virittämiseen tarvitaan 4,9 eV energiaa. Koska elektronit hidastuvat törmäyksien seurauksena, anodivirta pienenee jyrkästi.



Kun kiihdytysjännitettä kasvatetaan, anodivirta alkaa jälleen kasvaa. Kun kiihdytysjännite on kasvanut 4,9 V, on elektroneilla riittävästi energiaa kahden elohopea-atomin virittämiseen ja anodivirta pienenee jälleen voimakkaasti. Sama toistuu aina, kun kiihdytysjännitettä kasvatetaan 4,9 V lisää. Viritystilan purkautuessa elohopea-atomit emittoivat fotonin, jonka energia on sama kuin atomin perustilan ja viritystilan energiaero.

Fluoresenssi ja fosforesenssi

Fluoresenssi-ilmiössä virittyneet atomit tai molekyylit palaavat viritystilalta perustilaan yhden tai useamman välitilan kautta välittömästi virittymisen tapahduttua ja lähettävät näkyvää valoa. Fluoresenssi päättyy siis samalla hetkellä kuin siihen kohdistuva, virityksen aiheuttava säteily päättyy.



Joissakin aineissa viritystila on pitkäikäinen, ja nämä aineet säteilevät vielä virittävän säteilyn loputtuakin. Tätä ilmiötä kutsutaan **fosforesenssiksi** (viivästyneeksi fluoresenssiksi). Viritystilat synnytetään tavallisesti sähkömagneettisen säteilyn avulla. Atomin virittäneen säteilyn taajuus on suurempi (aallonpituus pienempi) kuin atomin emittoiman säteilyn taajuus. Kuvassa fotoni a virittää atomin: fotonin energia on $hf_a = hf_b + hf_c$.

Fluoresenssia hyödynnetään monin eri tavoin. Kaupan kassalla setelien aitous voidaan varmistaa UV-lampun ja fluoresenssi-

Hampaat hohtavat yökerhon UV-A-lamppujen valossa. Myös rikostutkinnassa ja esimerkiksi setelien aitouden tutkimisessa hyödynnetään fluoresenssia.

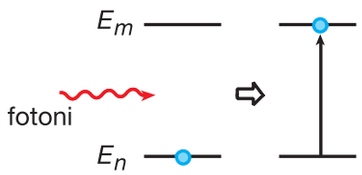
ilmiön avulla. Veri- ja hikijäämät loistavat UV-lampun aiheuttaman fluoresenssin takia, vaikka ne saattavat olla valkoisessa valossa näkymättömiä. Tätä käytetään hyödyksi rikostutkinnassa. Yökerhoissa ja hohtokeilaushalleissa on käytössä UV-A-lamppuja, jotka saavat valkoiset vaatteet hohtamaan pimeässä.

Loisteputkessa on elohopeahöyryä ja putken sisäpinnalla fluoresoivaa ainetta. Kun putkessa kiihdytetyt elektronit törmäilevät elohopeahöyryn atomeihin, atomit virittyvät. Palatessaan perustilaan atomit emittoivat ultraviolettisäteilyä, jota fluoresoivan aineen atomit absorboivat siirtyen samalla viritystilaan. Kun fluoresoivan aineen atomit palaavat perustilaan, ne lähettävät näkyvää valoa. Loisteputken sisäpinnassa olevan loisteaineen koostumus vaihtelee halutun valon laadun ja sävyn mukaan. Loisteputket ovat ongelmajätettä niiden sisältämän elohopean takia. Niitä käytetään mm. energiansäästölampuissa.

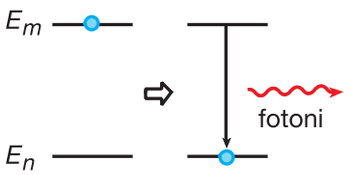
Laseria käytetään esimerkiksi teollisuudessa, lääketieteessä ja viihdeteollisuudessa.

Laser

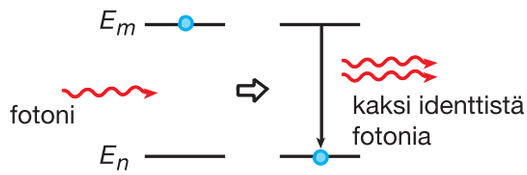
Atomiin osuva sopivan taajuinen fotoni voi saada atomin virittymään. Viritystila purkautuu yleensä spontaanisti, mutta purkautumisen voi saada aikaan myös atomiin osuva fotoni, jonka energia on sama kuin energiatasojen energiaero.



a) Absorptio.

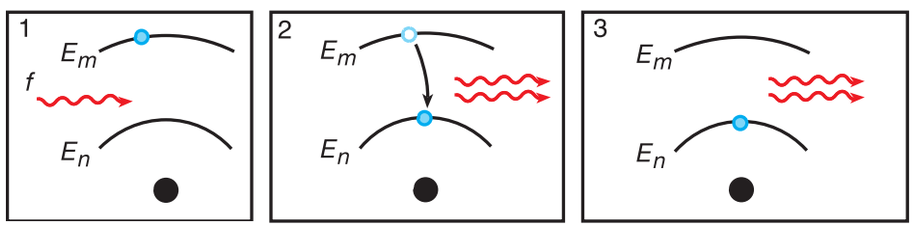


b) Spontaani emissio.



c) Stimuloitu emissio.

Oletetaan, että sopivan aineen atomi on virittynyt viritystilaan E_m (kuva 1). Atomien virittäminen voidaan toteuttaa esimerkiksi sähköpurkauksen avulla.



Atomiin osuu fotoni, jonka taajuus on $f = \frac{E_m - E_n}{h}$. Fotoni vaikuttaa atomiin niin, että elektroni siirtyy energiatilaan E_n (2) ja atomin viritystila purkautuu: atomi säteilee fotonin, jolla on sama taajuus kuin atomiin osuneella fotonilla (2). Tätä ilmiö-

Blu-ray-levyjen luentaan käytetään lyhytaaltopituista sinistä laseria punaisen sijaan. Siksi yhdelle levylle voidaan tallentaa enemmän dataa.

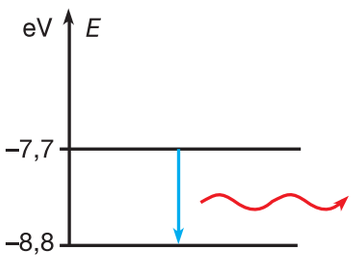
tä kutsutaan **stimuloiduksi emissioksi**. Siinä virittynyt atomi stimuloidaan energialtaan oikean fotonin avulla luovuttamaan säteilykvantti. Se on yksi säteilyn ja atomin välisen vuorovaikutuksen muoto.

Lopputuloksena on kaksi fotonia, joilla on täsmälleen sama taajuus (2 ja 3). Nämä fotonit saavat edelleen uusia virittyneitä atomeja purkautumaan, jolloin syntyy suuri joukko samantaajuisia fotoneja. Syntyy valoa, jota kutsutaan **laservaloksi**.

Laseriksi kutsutaan laitetta, jossa voidaan saada aikaan stimuloitu emissio. Laserin valo on monokromaattista ja koherenttia valoa: sen aalloilla on sama taajuus ja vaihe. Valolla on myös suuri intensiteetti. Laserin sisällä on putki, jonka päihin asennetuista peileistä toinen on puoliläpäisevä. Valo heijastuu peilien välillä edestakaisin, jolloin laserin valon intensiteetti kasvaa. Laservalo tulee ulos laserista puoliläpäisevän peilin kautta.

Tehtäviä

2-8. a) Franck ja Hertz käyttivät vuonna 1914 kuuluisassa kokeessaan pienipaineista elohopeahöyryä. He osoittivat, että atomi ottaa energiaa vastaan vain tietynsuuruisina kvantteina. Perehdy Franckin ja Hertzin kokeeseen.
b) Elohopea-atomin eräät energiatilat ovat −4,9 eV, −5,5 eV, −6,7 eV, −7,7 eV ja −8,8 eV. Minkä energiatilojen välistä siirtymää vastaa fotonin aallonpituus 580 nm?
c) Elohopea-atomin viritystila −7,7 eV purkautuu energiatilaan −8,8 eV. Laske emittoituneen fotonin aallonpituus.



2-9. Cesiumatomissa kahden tietyn energiatilan erotus on 41,4 μeV. Elektroni siirtyy kyseisen energiatilavälin. Laske sen säteilyn
a) taajuus b) aallonpituus,
jonka cesiumatomi tällöin emittoi.

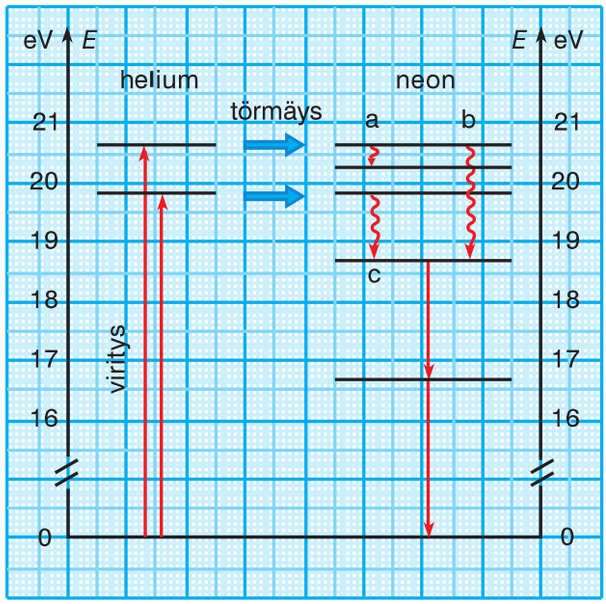
2-10. Vetyatomissa elektroni siirtyy viritystilalta −1,5 eV perustilaan −13,6 eV. Laske syntyvän säteilyn taajuus.

2-11. Vetyatomin kokonaisenergiat saadaan kaavasta $E_n = -\frac{13{,}6\ \text{eV}}{n^2}$.
a) Piirrä vetyatomin energiatasokaavio.
b) Fotoni törmää perustilassa olevaan vetyatomiin. Mitä tapahtuu, jos fotonin energia on
1) 1,89 eV 2) 3,40 eV
3) 10,2 eV 4) 15,6 eV?
[K2004, 9]

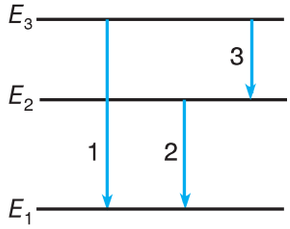
2-12. Heliumatomin ionisoitumisenergia on 24,6 eV.
a) Laske sen säteilyn aallonpituus, joka pystyy ionisoimaan heliumatomin.
b) Millä nopeudella atomiin törmäävä elektroni pystyy aiheuttamaan saman ionisoitumisen?

2-13. Revontulissa havaittava punainen valo (630,0 nm) on peräisin happiatomin erään viritystilan purkautumisesta. Revontulet syntyvät siten, että avaruudesta tulevat alun perin suurienergiaiset hiukkaset törmäävät ilmakehän ylemmissä kerroksissa atomeihin ja molekyyleihin, jolloin saadaan suuri määrä pienempienergiaisia hiukkasia, mm. elektroneja. Nämä vuorostaan törmätessään virittävät atomeja ja molekyylejä, jolloin syntyvät viritystilat purkautuvat mm. revontulivalona.
a) Ajatellaan, että em. happiatomin virittyminen tapahtuu atomin ja elektronin törmäyksen kautta. Kuinka suuri liike-energia elektronilla tulee vähintään olla, jotta saataisiin punaista revontulivaloa?
b) Mikä on tällaisen elektronin nopeus?
c) Kuinka suurella jännitteellä elektronin saisi pysähtymään?

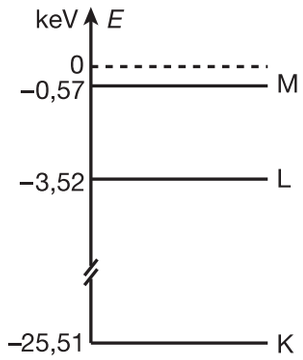
2-14. a) Kerro laservalon tärkeimmistä ominaisuuksista.
b) Kuviossa esitetään He-Ne-laserin yksinkertaistettu energiatasokaavio. Aaltonuolilla a, b ja c on merkitty mahdolliset lasersiirtymät (stimuloitu emissio). Laske siirtymiä vastaavat aallonpituudet. Minkä väristä on näissä siirtymissä syntyvä valo?



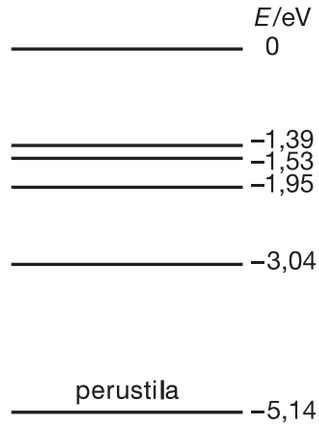
2-15. Kuvassa on atomin kolme energiatilaa. Energiatilan muutoksia 1 ja 2 vastaavat atomin emittoiman säteilyn aallonpituudet ovat 25,6 nm ja 30,4 nm. Laske sen säteilyn aallonpituus, joka vastaa kuvaan numerolla 3 merkittyä energiatilan muutosta.



2-16. Kuvassa on esitetty yksinkertaistetusti hopea-atomin elektronikuoria vastaavat energiatasot.
a) Kun hopeanäytettä pommitetaan riittävän suurienergiaisilla elektroneilla, atomista irtoaa K-kuoren elektroni. Kuinka suurella jännitteellä elektronit täytyy vähintään kiihdyttää?
b) Millaista säteilyä syntyy, kun elektronit, joilla on a-kohdassa laskettu energia, törmäävät kiinteään hopeanäytteeseen? [K1997, 14]

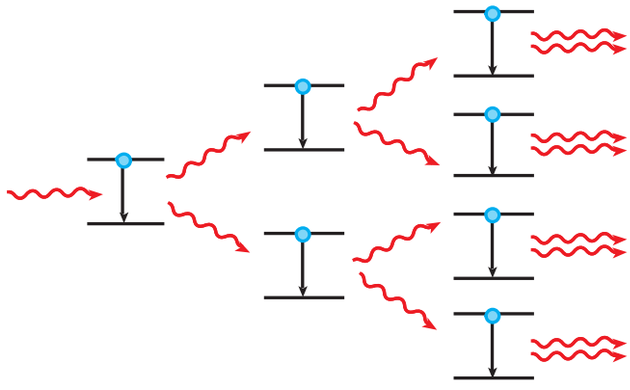


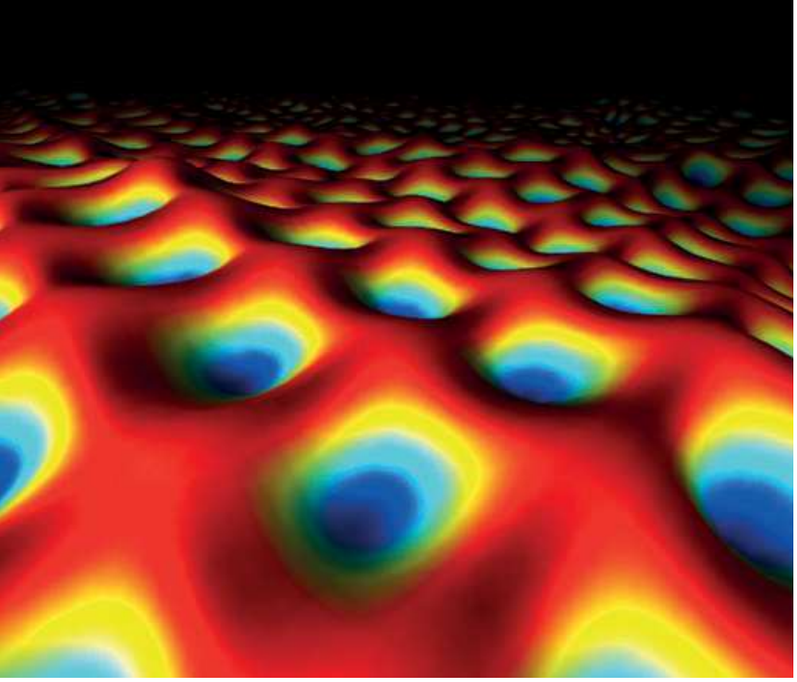
2-17. Natriumatomilla on täysien pääkuorien ulkopuolella yksi elektroni. Niin ollen sitä voidaan tarkastella yksielektronisena vedyn kaltaisena atomina. Kuvassa on esitetty yksinkertaistettu osa natriumin energiatasokaaviota.
a) Natriumhöyryn atomeja pommitetaan purkausputkessa elektroneilla. Kuinka suuri täytyy elektronin energian vähintään olla, jotta se pystyisi ionisoimaan perustilassa olevan natriumatomin?
b) Mitä energioita voi esiintyä putkesta tulevassa säteilyssä, jos pommittavien elektronien maksimienergia on 3,3 eV?
c) Natriumille tunnusomaisen keltaisen valon aallonpituus on 589 nm. Minkä siirtymän tuloksena tämä säteily syntyy?
d) Piirrä kuvio, josta ilmenevät kohdissa a, b ja c tarkastellut siirtymät.



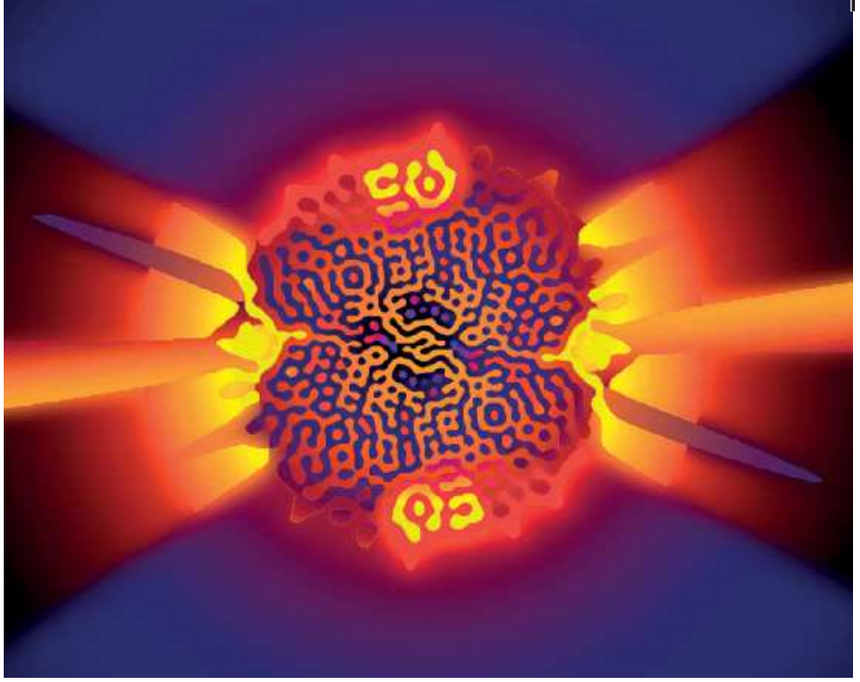
2-18. a) Selitä käsitteet fluoresenssi ja fosforesenssi.
b) Joidenkin kellojen viisarit voivat hohtaa valoa vielä sen jälkeen, kun huone on pimennetty. Mistä on kysymys?

2-19. a) Perehdy laserin syntyhistoriaan ja käyttökohteisiin.
b) Selitä laserin toimintaperiaate. Miten oheinen piirros liittyy laserin toimintaan?





Metallin pinta kvanttikuvauksena. Punainen väri kuvaa elektroneja ja sininen positiivisia metalli-ioneja.



Tunneloituminen on kvanttimekaaninen ilmiö, jonka vuoksi hiukkanen voi tietyllä todennäköisyydellä läpäistä potentiaalivallin. Tähän ei klassisen fysiikan mukaan olisi riittävästi energiaa.

2.3 Kvanttimekaaninen atomimalli

Kvantti-ilmiöitä kuvataan matemaattisesti **kvanttimekaniikan** avulla. Kvanttimekaniikka poikkeaa monella tavalla makroskooppisia ilmiöitä kuvaavasta klassisesta mekaniikasta. Sen lähtökohta on atomitason ilmiöissä havaittu suureiden, kuten energian, kvantittuminen. Kvanttimekaniikan mukaan hiukkasten käyttäytymistä ei voi täysin ennakoida, vaan tiedetään vain, millä todennäköisyydellä hiukkanen käyttäytyy milläkin tavalla.

Saksalainen fyysikko *Werner Heisenberg* (1901–1976) esitti vuonna 1927 lain, jota kutsutaan Heisenbergin **epätarkkuusperiaatteeksi**. Sen mukaan on mahdotonta tuntea tai mitata samanaikaisesti tarkasti hiukkasen paikka ja liikemäärä (nopeus). Jos halutaan tutkia atomaarisen hiukkasen, kuten elektronin, paikkaa, sitä on pommitettava muilla atomaarisilla hiukkasilla tai fotoneilla. Hiukkasen paikasta saadaan tietoa hiukkasten liikeradoissa tapahtuvien muutosten perusteella. Mittaus vaikuttaa kuitenkin tutkittavan hiukkasen paikkaan ja myös liikemäärään. Jos mittauksessa käytetään lyhyempää aallonpituutta, paikka saadaan mitattua tarkemmin, mutta samalla lisääntyy liikemäärän epätarkkuus.

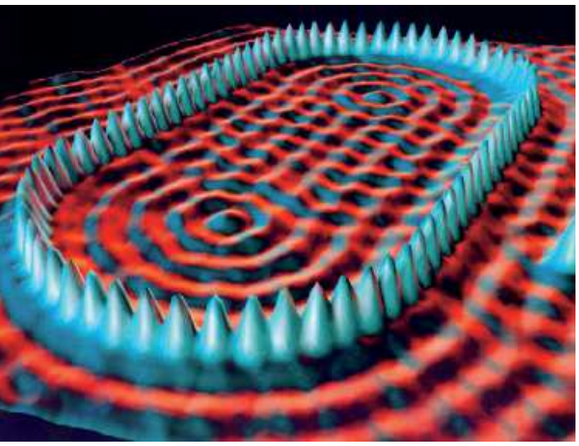
Epätarkkuusperiaate on yksi kvanttimekaniikan kulmakivistä ja tärkeä atomien ja hiukkasten käyttäytymisen ymmärtämisessä. Epätarkkuuden suuruutta kuvaa Planckin vakio *h*. Koska Planckin vakio on hyvin pieni, epätarkkuusperiaatteella ei ole merkitystä makroskooppisten ilmiöiden tarkastelussa. Makroskooppisia ilmiöitä mitattaessa mittausvirheet ylittävät moninkertaisesti epätarkkuusperiaatteen asettaman rajan.

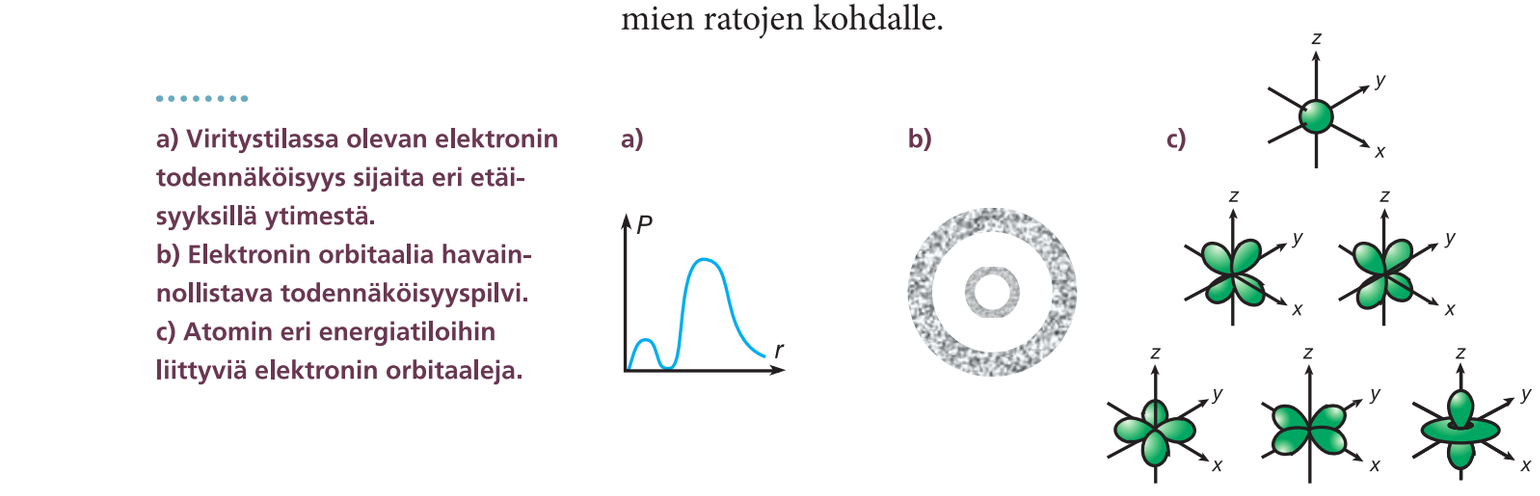
Epätarkkuusperiaatteen mukaan atomaarista hiukkasta, kuten elektronia, ei voida käsitellä klassisen mekaniikan tapaan kappaleena, jolla on tarkkaan määritelty paikka ja nopeus. Kvanttimekaniikka ei kuvaa elektronin liikettä atomissa tiettyinä ytimen ympärillä olevina ratoina, kuten Bohrin malli. Radan käsite menettää kvanttimekaniikassa merkityksensä.

Itävaltalainen fyysikko *Erwin Schrödinger* (1887–1961) esitti vuonna 1926 **kvanttimekaanisen atomimallin**. Tässä mallissa elektronin tilaa kuvataan aaltofunktiolla. Aaltofunktiosta voidaan määrittää **todennäköisyys**, jolla elektroni löytyy tietyltä alueelta ytimen ympäriltä. Schrödingerin teorian perusteella voidaan määrittää myös atomin energiat. Aaltofunktio kuvaa lisäksi elektronin aaltomaiset ominaisuudet, de Broglien aallot. Schrödingerin teoriaa voidaan soveltaa kaikkiin atomimaailman ilmiöihin.

Bohrin mallin mukainen kuva atomista planeettamaisena järjestelmänä ei vastaa kvanttimekaanista atomimallia. Kvanttimekaanisessa mallissa ytimen ympärillä liikkuvia elektroneja voidaan kuvata elektronipilvellä. Pilvi on tiheä siellä, missä aaltofunktion antama todennäköisyys elektronin sijainnille on suuri, ja harva siellä, missä todennäköisyys on pieni. Pilven tiheimpiä alueita kutsutaan orbitaaleiksi, ja ne keskittyvät Bohrin mallin ennustamien ratojen kohdalle.

Tunnelointielektronimikroskoopilla tehty kuva rauta-atomeista. Sisällä olevat aallot kuvaavat elektronien sijainnin esiintymistodennäköisyyksiä.



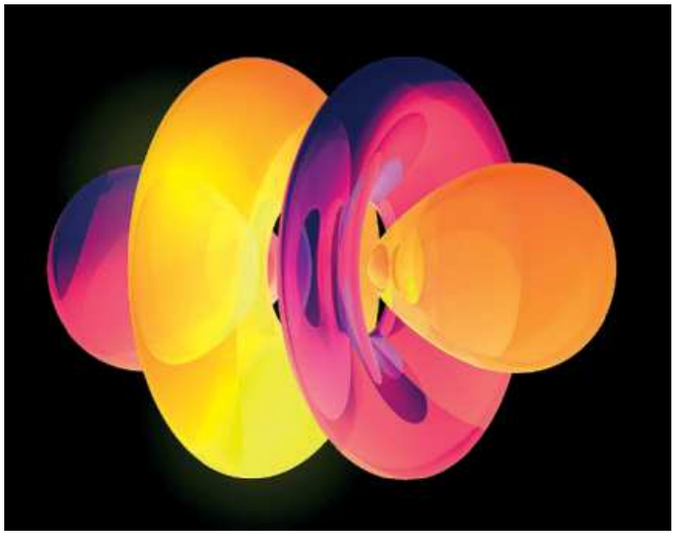


a) Viritystilassa olevan elektronin todennäköisyys sijaita eri etäisyyksillä ytimestä.
b) Elektronin orbitaalia havainnollistava todennäköisyyspilvi.
c) Atomin eri energiatiloihin liittyviä elektronin orbitaaleja.

Tehtäviä

2-20. Mitkä seuraavista väitteistä ovat tosia? Perustele näkemyksesi.
a) Elektroni voi siirtyä atomissa energiatilalta toiselle. Jos energiatilojen välinen ero on suuri, emittoituvan tai absorboituvan kvantin taajuus on suuri.
b) Ydintä kiertävän elektronin nopeuden suuntaa muuttuu jatkuvasti. Elektroni on kiihtyvässä liikkeessä ja lähettää sähkömagneettista säteilyä.
c) Elektronilla ei ole rataa, jota se kiertäisi. Radan sijaan puhutaan elektronin tilasta ja todennäköisyyspilvistä.
d) Bohrin atomimallia ei ole voitu yhdistää muihin atomeihin kuin vetyyn.

2-21. a) Kuvassa on 4f3z-orbitaali. Mikä on orbitaali?



b) Mitä tarkoittaa atomin elektronikonfiguraatio?
c) Miksi kvanttimekaanisen atomimallin mukaan elektronin rataa tai nopeutta ei ole mielekästä tarkastella?
d) Millainen on elektronin liikeyhtälö kvanttimekaanisessa atomimallissa?

2-22. Miten seuraavat käsitteet liittyvät kvanttimekaaniseen atomimalliin?
a) kvantti
b) epätarkkuusperiaate
c) todennäköisyys

2-23. Elektronin orbitaalin ilmaisee neljä kvanttilukua. Selvitä, mitkä nämä kvanttiluvut ovat ja mitä ne ilmaisevat.

2-24. Atomin kuorimalli liittyy läheisesti kemiaan. Selvitä, mitä atomin kuorimallilla tarkoitetaan.

Testaa, osaatko

Oikeita vastausvaihtoehtoja voi olla yksi tai useampia.

1. Joseph J. Thomson havaitsi kokeessaan
a) protonin
b) neutronin
c) elektronin.

2. Rutherfordin koe osoitti, että
a) atomissa on pienikokoinen ydin
b) atomin massa on keskittynyt ytimeen
c) ytimen sähkövaraus on positiivinen.

3. Bohrin vetyatomimallissa elektronin pitää radallaan
a) gravitaatiovoima
b) vahvan vuorovaikutuksen aiheuttama voima
c) Coulombin voima.

4. Atomi on perustilassa silloin, kun sen kokonaisenergia on
a) pienin
b) suurin
c) nolla.

5. Vedyn ionisointienergia tarkoittaa energiaa, joka tarvitaan siirtämään elektroni
a) perustilasta seuraavaan, ylempään energiatilaan
b) perustilasta johonkin toiseen energiatilaan
c) pois vetyatomista.

6. Kun hopea-atomi siirtyy energiatasolta toiselle, energiaa vapautuu 2,29 eV. Tällöin atomi emittoi
a) fotonin, jonka energia on 2,29 eV
b) vihreää valoa, jonka aallonpituus on 546 nm
c) UV-säteilyä, jonka aallonpituus on 329 nm.

7. Mitkä väitteistä ovat oikein?
a) Fosforesenssissa aineessa viritystila on pitkäikäinen ja aine säteilee vielä virittävän säteilyn loputtuakin.
b) Fosforesenssissa tarvittavat viritystilat synnytetään kemiallisesti.
c) Setelien aitous voidaan selvittää fluoresenssia hyödyntämällä.

8. Mitkä väitteistä ovat oikein?
a) Atomiin osuva sopivan taajuinen fotoni voi saada atomin virittymään.
b) Atomin viritystila voi purkautua spontaanisti.
c) Atomin viritystilan purkautumisen voi saada aikaan myös siihen osuva fotoni, jonka energia on sama kuin energiatasojen energiaero.

9. Kvanttimekaniikan mukaan
a) tietyt suureet ovat kvantittuneita
b) yksittäisen hiukkasen käyttäytyminen voidaan ennakoida
c) mikromaailmassa mittaustarkkuudella on teoreettinen raja.

10. Kvanttimekaanisessa atomimallissa
a) elektronilla on ympyrärata ytimen ympärillä
b) elektronin tilaa kutsutaan orbitaaliksi
c) pääkvanttiluku n ilmaisee elektronin etäisyyden ytimestä ja tilan energian.

Tiivistelmä

- Bohrin vetyatomimallin oletukset
  – Elektroni kiertää pientä positiivisesti varattua ydintä ympyrärataa pitkin.
  – Elektroni pysyy radallaan Coulombin lain mukaisen ytimen ja elektronin välisen vetovoiman johdosta.
  – Elektronin liikeyhtälö on $\Sigma\overline{F} = m\overline{a}_n$ eli $k\frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$.
  – Elektroni voi liikkua vain tiettyjä erisäteisiä ratoja pitkin. Elektronin energia ei muutu elektronin ollessa sallitulla radalla, eikä atomi silloin lähetä sähkömagneettista säteilyä. Pääkvanttiluku n ilmoittaa, mikä rata ytimestä lähtien on kysymyksessä.
  – Kun atomi siirtyy sallitusta (pysyvästä) tilasta toiseen, atomi emittoi tai absorboi energiakvantin (fotonin): tällöin elektroni siirtyy radalta toiselle. Kvantin energia on eri tiloja vastaavien elektronin kokonaisenergioiden erotus eli $E = hf = E_m - E_n$, jossa h on Planckin vakio ja f säteilyn taajuus.

- Atomi on perustilassa silloin, kun sen kokonaisenergia on pienin. Atomin muut energiatilat ovat viritystiloja.

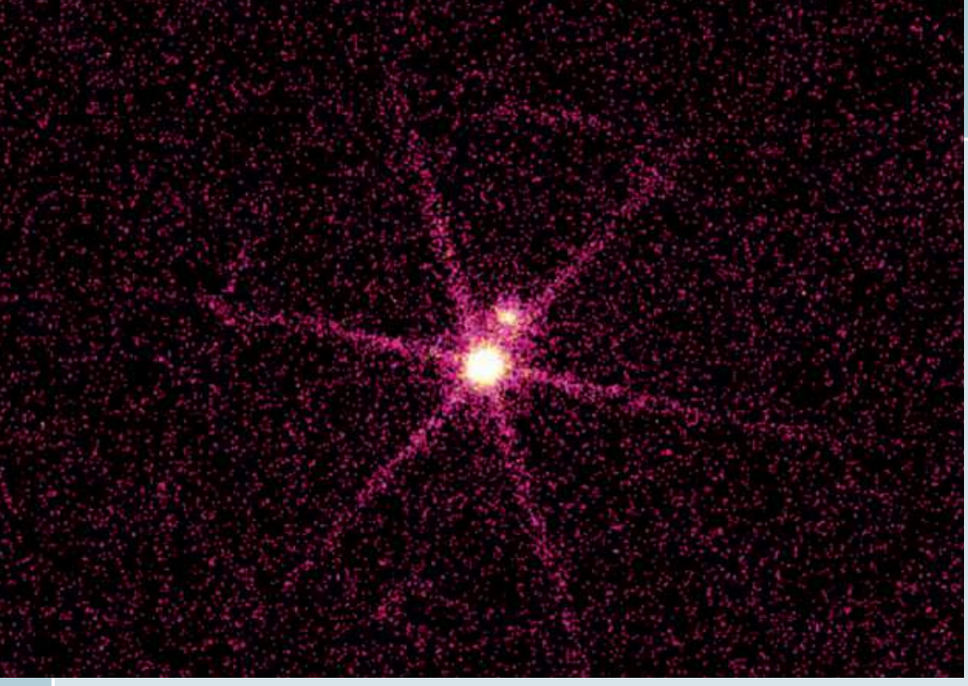
- Kvantin (fotonin) energia on $hf = E_m - E_n$, jossa h on Planckin vakio ja f kvantin taajuus. E_m ja E_n ovat energiatilojen m ja n energiat ($m > n$).

- Vetyatomin pysyvien (stationääristen) tilojen energiat saadaan yhtälöstä $E_n = -\frac{13{,}6}{n^2}$ eV, jossa $n = 1, 2, 3, \ldots$
  Vetyatomi on perustilassa, kun sen energia on pienin mahdollinen eli $n = 1$. Vetyatomin energiatilat ovat kvantittuneet.

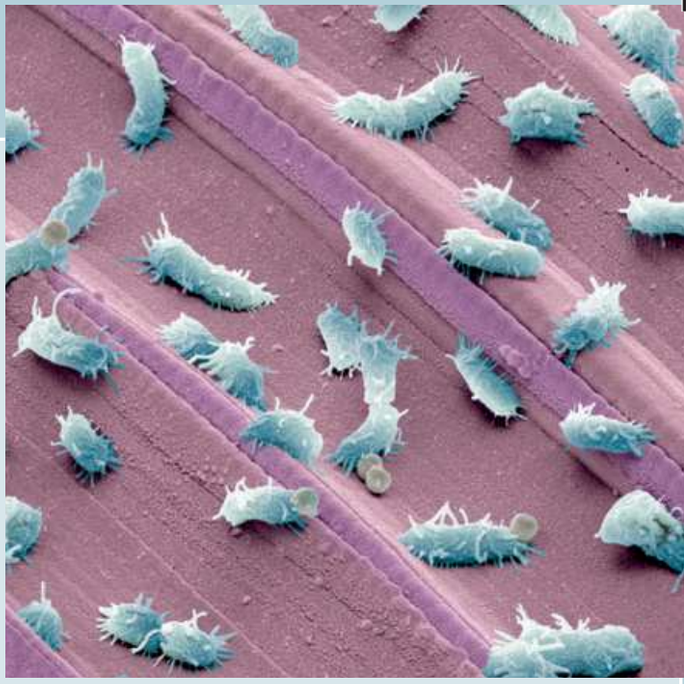
3 Aineen rakenteen tutkiminen

Tässä luvussa opit
- **spektrin**
- **aineen rakenteen tutkimusta.**

Keskeisiä käsitteitä ovat
- **emissio- ja absorptiospektri**
- **röntgendiffraktio.**



Sirius on kaksoistähti, jossa kirkasta tähteä (Sirius A) kiertää pieni valkoinen kääpiö (Sirius B). Sirius B on voimakas röntgensäteilyn lähde.



Pyyhkäisyelektronimikroskoopin kuva on 11 500-kertainen suurennos. Esim. seisoneesta vedestä pystytään erottamaan bakteereja.

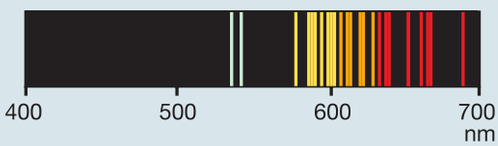
Aineen rakenteen tutkimus kehittyy

Aineen rakennetta voi tutkia mikroskopiaa, spektroskopiaa tai sirontaa hyödyntämällä. Mikroskooppeja alettiin käyttää aineen rakenteen tutkimuksessa 1600-luvun lopulla.

Spektroskopiassa ainetta analysoidaan sen spektrin avulla. Spektristä saadaan selville esimerkiksi aineen sisältämät alkuaineet. Röntgensäteilyn avulla saadaan tietoa atomien ja molekyylien elektroniverhon rakenteesta.Elektronimikroskooppia käytetään paljon mm. nanoteknologiassa ja biologiassa. Atomivoimamikroskoopin avulla saadaan parhaimmillaan näkyviin yksittäiset atomit.

Atomien, molekyylien ja aineen kiderakenteen tutkimuksessa haastavaa on tutkittavien kohteiden pieni koko.

Aineen rakenteen tutkimuksessa sirontakoe on tyypillinen tutkimusmenetelmä. Sen avulla tutkitaan mm. kiinteän aineen hilarakennetta, atomin rakennetta, ydintä sekä vielä pienempiä rakenteita, kuten kvarkkeja. Koska siroavien hiukkasten de Broglien aallon aallonpituuden on oltava tutkittavan kohteen suuruusluokkaa, ammushiukkasten energia on varsin suuri. Tyypillisiä ammushiukkasia ovat elektronit, positronit, protonit, neutronit ja alfahiukkaset sekä kiinteää ainetta tutkittaessa röntgenkvantit. Sironneiden hiukkasten kulmajakauman perusteella voidaan tehdä johtopäätökset aineen rakenteesta.



Neonin viivaspektri.

Auringonvalon spektri on jatkuva, kun taas heliumin spektri on viivaspektri eli epäjatkuva.

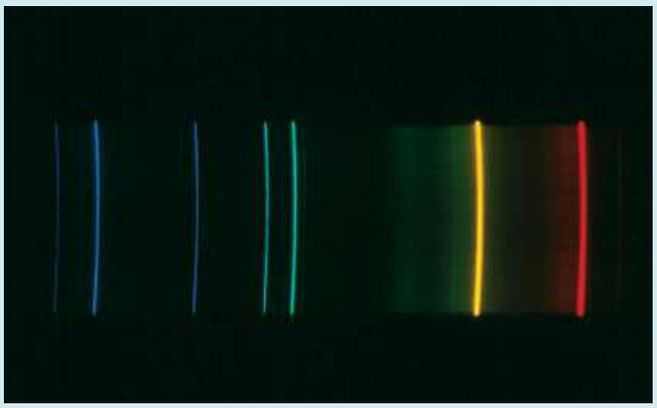
3.1 Spektrit

Atomin elektroniverhorakenteen tarkka tutkimus alkoi atomin emittoiman (lähettämän) säteilyn spektrin tutkimuksesta. **Spektri** on säteilyn intensiteetin aallonpituus- tai taajuusjakauma. Sitä tutkimalla voidaan selvittää atomin energiatiloja sekä saada tietoa atomien ja molekyylien rakenteesta. Spektrit voivat olla jatkuvia tai viivaspektrejä. Klassinen fysiikka ei pystynyt selittämään kaasun lähettämää viivaspektriä, koska atomin elektronirakennetta ei tunnettu riittävästi.

Oppilastyö ▪ Spektri

1. Suuntaa valkoinen valo sekä prisman että hilan läpi valkokankaalle. Mitä havaitset?

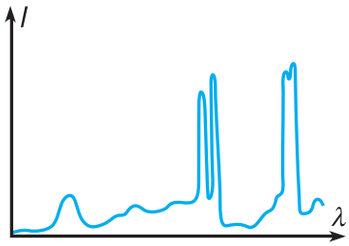
2. Spektroskooppi on laite, jonka avulla voidaan tutkia valon spektriä. Tutki spektroskoopin avulla Auringon, loisteputken ja kaasupurkausputken valoa.



Oppilastyön kohdassa 1 havaitaan, että valkoinen valo hajoaa eri aallonpituuksiin (väreihin) kulkiessaan prisman tai hilan läpi. Oppilastyön kohdassa 2 esimerkiksi heliumin spektrin huomataan olevan viivaspektri (kuvassa oikealla).

Spektriä sanotaan **jatkuvaksi**, jos eri aallonpituusalueet vaihtuvat toisikseen ilman selviä rajoja eli jos aallonpituusalueet muodostavat jatkumon. Auringonvalon spektri on jatkuva, samoin hehkulampun valon. Kaikki kiinteät kappaleet lähettävät säteilyä, jolla on jatkuva spektri.

Spektroskoopissa valo kulkee kapean raon läpi ja hajoaa spektriksi (valon diffraktio). Oppilastyön kohdassa 2 loisteputken valossa havaitaan vain muutamia erillisiä spektriviivoja. Kaasumaisten yksiatomisten alkuaineiden spektrejä kutsutaan **viivaspektreiksi**. Viivaspektri on epäjatkuva spektri.



Spektri
Spektri on säteilyn intensiteetin aallonpituus- tai taajuusjakauma.
Spektri voi olla jatkuva tai viivaspektri.

Spektroskopia on yleisnimitys menetelmille, joilla ainetta analysoidaan sen spektrin avulla. Jokaisella alkuaineella on tunnusomainen spektrinsä, joten spektroskopiaa voidaan käyttää aineen tunnistamiseen. Esimerkiksi planeettojen kaasukehien koostumuksen ja ilmansaasteiden tutkimuksessa käytetään spektroskopiaa. Spektrin intensiteetin graafisessa esityksessä huipun (”piikin”) korkeus ja paikka antavat tietoa tutkittavasta aineesta: piikkien paikat vastaavat spektriviivoja. Tutkittavan aineen spektriä verrataan tunnettuihin spektreihin. Aineen lähettämän säteilyn spektriviivojen intensiteeteistä (eli piikkien korkeuksista) voidaan määrittää näytteen sisältämien alkuaineiden suhteelliset määrät.

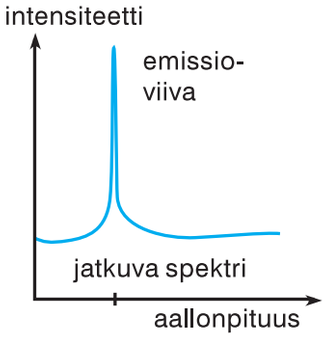
Loisteputken lähettämän valon intensiteettijakauma on erilainen kuin päivänvalon. Tämän takia monissa vaatekauppojen sovituskopeissa onkin päivänvaloa muistuttava valaistus.

Emissiospektri

Kaikki kappaleet emittoivat sähkömagneettista säteilyä. Aineen lähettämän valon ja muun sähkömagneettisen säteilyn spektriä kutsutaan **emissiospektriksi**. Se saadaan syntymään näkyvän

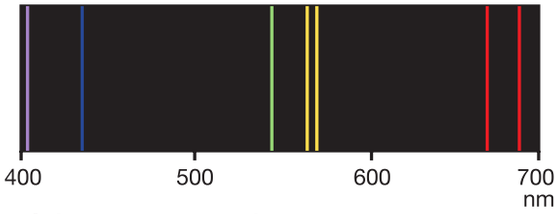
valon aallonpituusalueella esimerkiksi kuumentamalla ja hehkuttamalla ainetta.

Emissiospektri voi olla jatkuva tai koostua erillisistä spektriviivoista. Usein emissiospektrissä ovat nämä molemmat osat. Jatkuva spektri syntyy aineessa olevien varattujen hiukkasten värähtelyistä. Viivaspektri taas liittyy atomien energiamuutoksiin. Koska atomilla on tietyt energiatilat ja vain näiden tiettyjen tilojen väliset energiamuutokset ovat mahdollisia, atomi voi emittoida vain aallonpituudeltaan tietynlaiset fotonit. Siksi jokaisella aineella on oma, tyypillinen viivaspektrinsä. Hyvin pienetkin ainemäärät voidaan tunnistaa spektriviivojen avulla.



Hehkuvan kiinteän aineen tai nesteen lähettämästä säteilystä syntyy jatkuva spektri, joka on osittain näkyvän valon aallonpituusalueella. Esimerkiksi huonelämpötilassa olevat aineet lähettävät silmille näkymätöntä lämpösäteilyä infrapuna-aallonpituusalueella. Kuuman kappaleen, kuten lämpöpatterin, säteilyn voi tuntea, vaikka sitä ei voi nähdä.

Emissiospektri
Aineen lähettämän sähkömagneettisen säteilyn spektriä kutsutaan emissiospektriksi.
Emissiospektri voi olla jatkuva tai viivaspektri.



Elohopean viivaspektri.

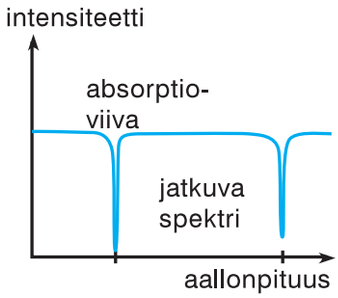
Loisteputken valosta voi nähdä elohopeahöyryn viivaspektrin.

Kaikki nesteet ja kiinteät kappaleet lähettävät säteilyä, joka voimistuu lämpötilan noustessa ja jonka spektri on jatkuva. Kuumien kappaleiden säteilemän valon aallonpituusjakauma on samanlainen riippumatta siitä, minkälaisesta kappaleesta on kysymys.

Absorptiospektri

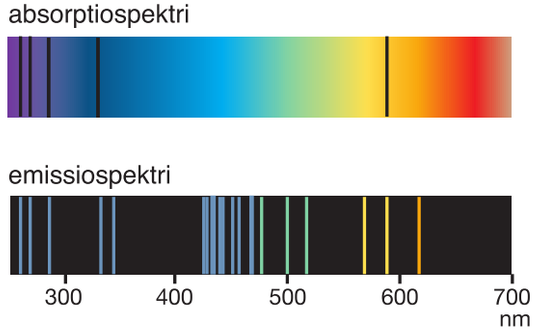
Aineet voivat paitsi emittoida myös absorboida (imeä) säteilyä. Kaasuatomit voivat absorboida jatkuvasta säteilystä vain tiettyjä aallonpituuksia vastaavaa säteilyä. Näistä aallonpituuksista syntyvät spektrin absorptioviivat. Tätä viivaspektriä kutsutaan **absorptiospektriksi**.

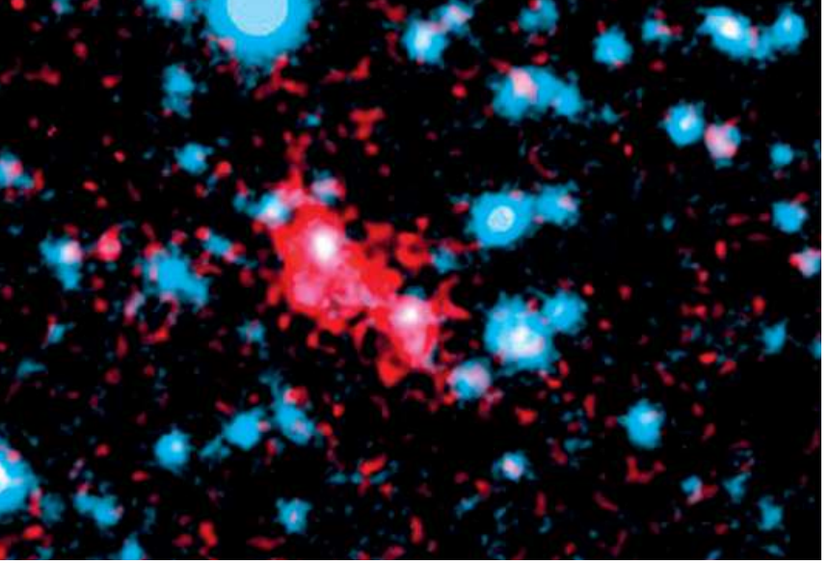
Kun valkoinen valo kulkee kaasun läpi, spektrissä havaitaan valoton (musta) viiva saman aallonpituuden kohdalla, jossa kaasun emissiospektrissä on valoisa viiva. Atomissa elektronille ovat mahdollisia vain tietyt energiatilat, ja spektriviivat syntyvät, kun elektroni siirtyy energiatilalta toiselle. Atomi virittyy eli elektroni siirtyy alemmalta energiatilalta ylemmälle absorboidessaan fotonin. Kun elektroni siirtyy ylemmältä energiatilalta alemmalle, atomi emittoi fotonin. Energiatilojen välinen energiaero määrää fotonin energian ja spektriviivan aallonpituuden. Siksi spektriviivat ovat emissio- ja absorptiospektrissä samojen aallonpituuksien kohdalla.

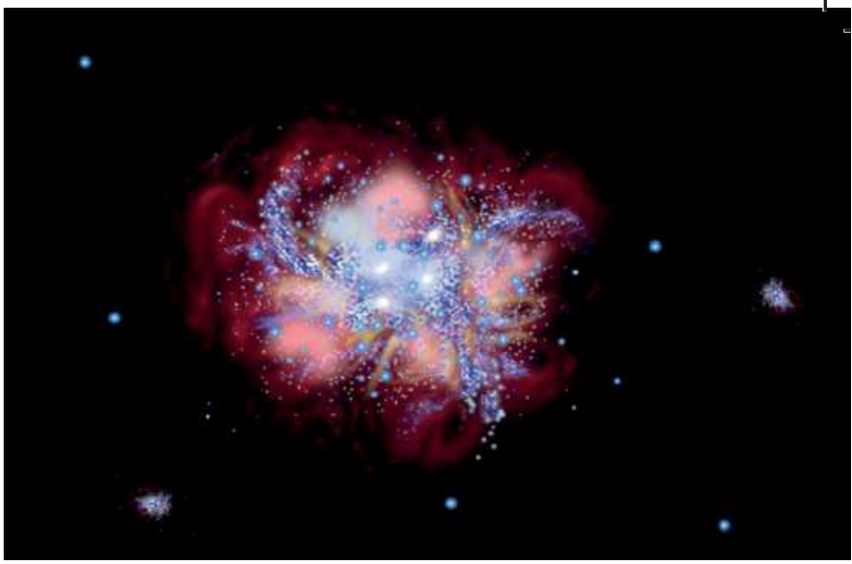


Huomaa, että kun absorboituvat fotonit virittävät atomeja, viritystilat eivät jää pysyviksi. Viritystilojen purkautuessa syntyvät fotonit emittoituvat kuitenkin kaikkiin suuntiin, joten näitä fotoneja osuu ilmaisimeen niin vähän, että kyseisten aallonpituuksien kohdalla havaitaan mustia viivoja eli absorptiospektri.

Kaasun läpi menneessä säteilyssä havaitaan mustia viivoja, joita vastaavien säteilykvanttien energia on yhtä suuri kuin absorptiosiirtymiä vastaavat energiatilojen erot perustilaan verrattuna. Kaasun kaikki absorptiospektrin spektriviivat näkyvät kaasun emissiospektrissä, mutta kaikki emissiospektrin viivat eivät näy absorptiospektrissä.





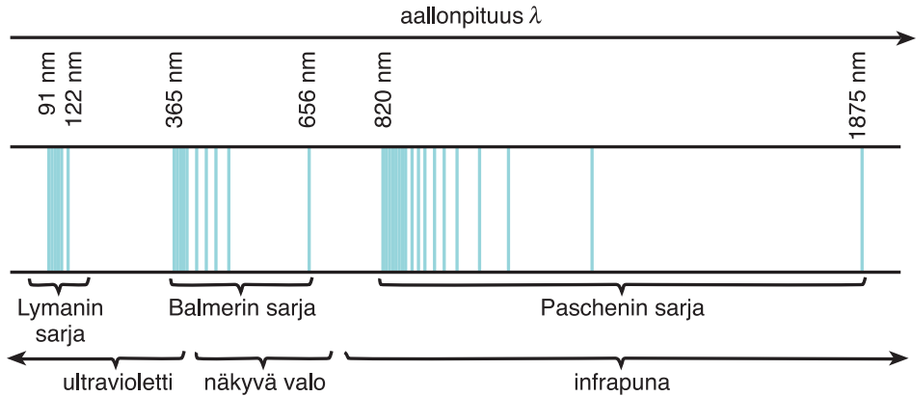


Punasiirtymää pidetään todisteena siitä, että galaksit etääntyvät toisistaan ja maailmankaikkeus laajenee. Punasiirtymä tarkoittaa sitä, että kaukaisten kohteiden, kuten galaksien, säteilemän valon spektriviivat ovat siirtyneet spektrin punaista päätä eli pidempiä aallonpituuksia kohti. Säteilyn aallonpituus kasvaa Dopplerin ilmiön mukaisesti.

Absorptiospektri
Absorptiospektri syntyy, kun kaasut absorboivat sähkömagneettista säteilyä.
Kaikki absorptiospektrin spektriviivat näkyvät kaasun emissiospektrissä.

Vetyatomin spektri

Vedyn spektrin havaittiin koostuvan erillisistä viivasarjoista ja ryhmistä, joissa ilmenevää säännönmukaisuutta ei osattu selittää.



Osa vetyatomin spektrisarjoista.

Sveitsiläinen matematiikan opettaja *Johann Balmer* (1825–1898) tutki näkyvän valon alueella olevaa vedyn spektriä. Hän huomasi vuonna 1885, että spektriviivojen aallonpituudet toteuttavat yksinkertaisen yhtälön $\frac{1}{\lambda} = R_\mathrm{H}\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right)$, jossa $m = 3, 4, 5, \ldots$ ja vakio R_H on nimeltään vedyn Rydbergin vakio, $R_\mathrm{H} = 1{,}0973731 \cdot 10^7 \ \frac{1}{\mathrm{m}}$. *Johannes Robert Rydberg* (1854–1919) oli ruotsalainen fyysikko.

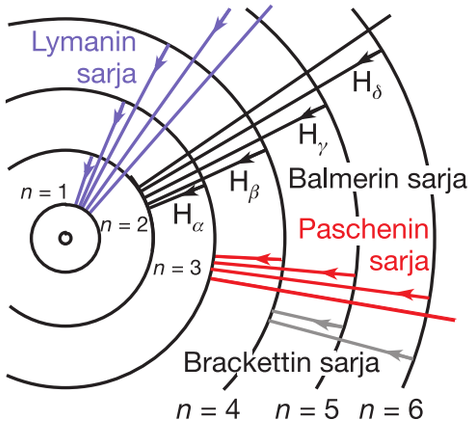
Vetyatomin spektrissä on spektrisarjoja myös infrapuna- ja ultraviolettialueella.

Vetyatomin spektriviivat

Vetyatomin spektrin viivoja vastaavat aallonpituudet saadaan yhtälöstä

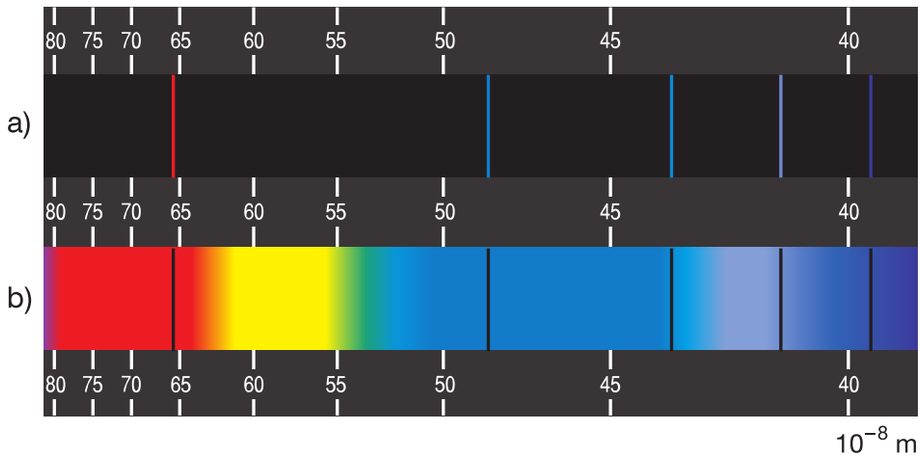
$$\frac{1}{\lambda} = R_{\mathrm{H}}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right),$$

jossa R_{H} on Rydbergin vakio ja $n = 1, 2, 3, \ldots$ sekä $m = n + 1, n + 2, \ldots$



Vetyatomien spektrisarjat on nimetty löytäjiensä mukaan. Kolme ensimmäistä sarjaa ovat Lymanin sarja (UV-alueella), Balmerin sarja (näkyvän valon alueella) ja Paschenin sarja (IR-alueella). Siirtymistä emittoituneet fotonit synnyttävät spektrisarjat.

Pääasiassa näkyvän valon alueella olevaa vetyatomin spektrisarjaa kutsutaan Balmerin sarjaksi. Pisintä aallonpituutta (siirtymä energiatilasta E_3 tilaan E_2) vastaavaa spektriviivaa merkitään symbolilla H_α, muita spektriviivoja symboleilla H_β, H_γ, H_δ, … Balmerin spektrisarjan viivat tulevat sitä lähemmäksi toisiaan, mitä lyhyempiin aallonpituuksiin siirrytään.



Vetykaasun näkyvän valon aallonpituusalueen a) emissiospektri ja b) absorptiospektri. Spektriviivat ovat molemmissa spektreissä samojen aallonpituuksien kohdalla, koska ne ovat syntyneet elektronien siirtyessä samojen energiatilojen välillä.

Pohdi ja etsi

3-1. Valkoinen valo kulkee prisman ja hilan läpi. Miten prismassa ja hilassa syntyvät valkoisen valon spektrit eroavat toisistaan?

3-2. a) Mitä spektrillä tarkoitetaan säteilyn yhteydessä?
b) Piirrä sopivaan koordinaatistoon periaatekuva
1) hehkulangan 2) kaasupurkausputken säteilyn spektristä.
c) Mitä tarkoitetaan absorptiospektrillä, ja miten se syntyy?

3-3. a) Mitä tarkoitetaan käsitteellä valon spektri? Piirrä periaatekuvio jatkuvasta spektristä ja viivaspektristä.
b) Mihin ilmiöihin perustuvat tavallisimmat näkyvän valon alueella toimivat spektrometrit? [S2001, 11]

3-4. a) Millaisella koejärjestelyllä saa näkyviin kaasun emissiospektrin ja absorptiospektrin?
b) Mitä yhteistä ja eroa on aineen absorptio- ja emissiospektreissä?

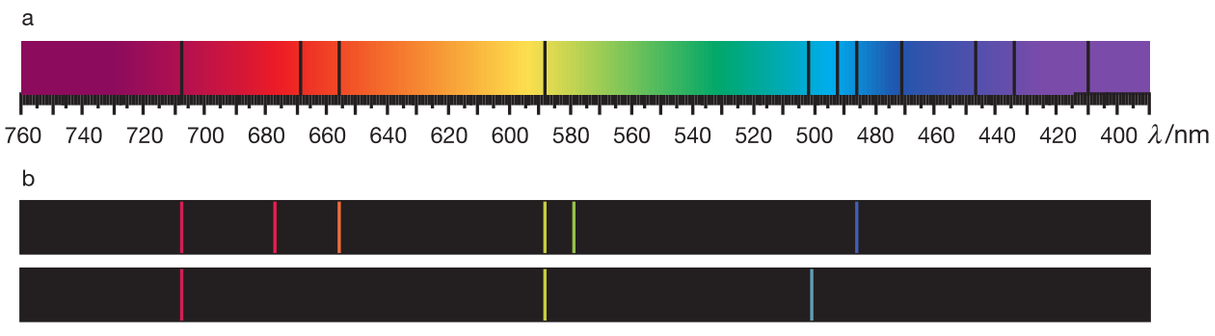
3-5. Kuvassa ylimpänä on erästä näytettä tutkittaessa saatu absorptiospektri. Kahdessa alemmassa kuvassa on kahden eri aineen a ja b emissiospektrit. Miten voit päätellä, että aineet a ja b sisältävät osittain samoja alkuaineita kuin tutkittu näyte?

3-6. Selvitä, mitä tarkoitetaan Fraunhoferin viivoilla ja mihin ne liittyvät.

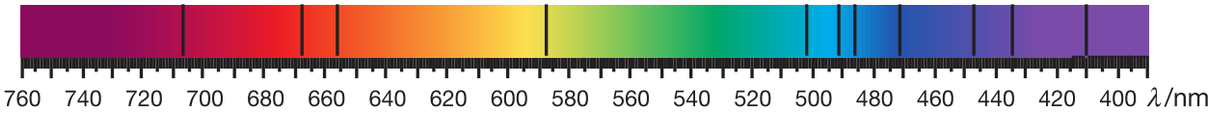
3-7. Tutkimusten mukaan ihmisen näköherkkyys on natriumvalossa yli kaksinkertainen verrattuna näkökykyyn valkoisessa valossa. Natriumlamppuja käytetäänkin mm. moottoriteiden valaistuksessa. Selvitä, kuinka natriumin spektri voidaan määrittää.

3-8. a) Tutustu tähtien kirkkausluokitukseen.
b) Tähtien spektreissä esiintyy absorptioviivoja. Mitä niiden avulla voidaan päätellä tähtien koostumuksesta?
c) Mitä voidaan päätellä tähtien spektrin punasiirtymästä?

3-9. a) Auringonvalo koostuu mm. ultravioletivalosta, joka voidaan jakaa kolmeen ryhmään: UV-A, UV-B ja UV-C.
a) Miten em. säteilylajit eroavat toisistaan?
b) UV-valolla voidaan selvittää esimerkiksi asiapapereiden väärennöksiä. Mihin menetelmä perustuu?



Tehtäviä



3-10. Yllä oleva kuva esittää erästä näytettä tutkittaessa saatua absorptiospektriä. Selvitä taulukkokirjan avulla, mitä kahta alkuainetta näytteessä on.

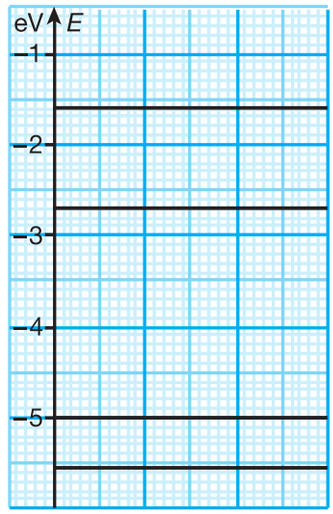
3-11. a) Laske Balmerin spektrisarjan H_α-viivan aallonpituus.
b) Laske Lymanin sarjan lyhin aallonpituus.

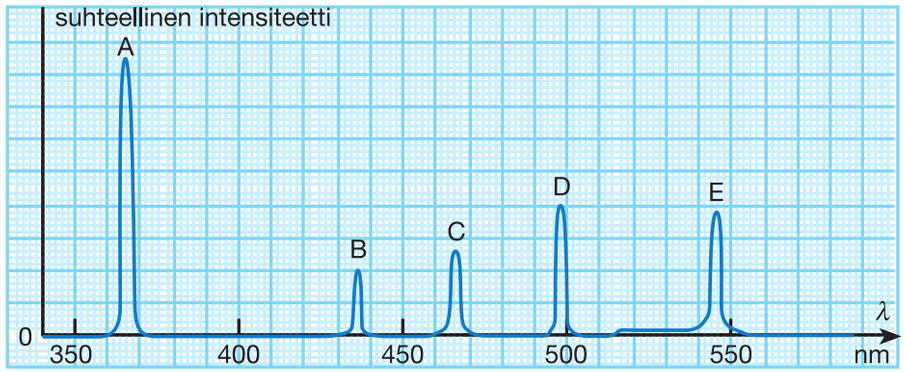
3-12. Vedyn Balmerin spektrisarjan pisin aallonpituus on 656 nm. Lymanin spektrisarjan pisin aallonpituus on silloin
1) 121 nm 2) 164 nm
3) 2620 nm 4) 3540 nm.

3-13. Osoita käyttäen yhtälöitä $E = hf$ ja $\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$, että vetyatomin energiatilojen energiat saadaan yhtälöstä

$$E_n = -\frac{13{,}6}{n^2}\ \text{eV}.$$

3-14. Kaasupurkausputken lähettämää säteilyä on tutkittu hilaspektrometrilla. Kuvioissa esitetään säteilyn intensiteetti aallonpituuden funktiona ja osa elohopea-atomin energiatasokaaviosta. Tutki, mitkä spektriviivoista A...E voivat olla peräisin Hg-atomin energiatilan muutoksista. Jäljennä energiatasokaavio vastauspaperiisi ja merkitse Hg-viivoja vastaavat siirtymät kaavioon.





Pariisin Louvren taidemuseossa on käytössä hiukkaskiihdytin, jolla tutkitaan PIXE-menetelmää soveltaen mm. taulujen aitoutta. Samaa menetelmää käytetään myös tutkittaessa ilmansaasteita.

3.2 Röntgensäteilyn käyttö aineen tutkimuksessa

Röntgensäteilyn käyttö on luvanvaraista ja valvottua, koska röntgensäteily on vaarallista ihmisen elimistölle.

Teollisuudessa röntgensäteilyä käytetään esimerkiksi valuvikojen ja hitsaussaumojen tutkimisessa. Viallisten kohtien läpi pääsee röntgensäteilyä enemmän kuin ehjän kohdan läpi, minkä takia viat näkyvät ilmaisimella tai filmillä tummuuseroina.

Jos tutkittavaa näytettä säteilytetään riittävän suurienergiaisilla hiukkasilla, esimerkiksi protoneilla, saadaan kohtioaineen ominaissäteilyn piikit näkyville röntgenspektriin. Tätä alkuaineen tunnistamisen menetelmää kutsutaan usein hiukkasherätteiseksi **röntgenemissioksi** eli PIXE-menetelmäksi (*Particle Induced X-ray Emission*).

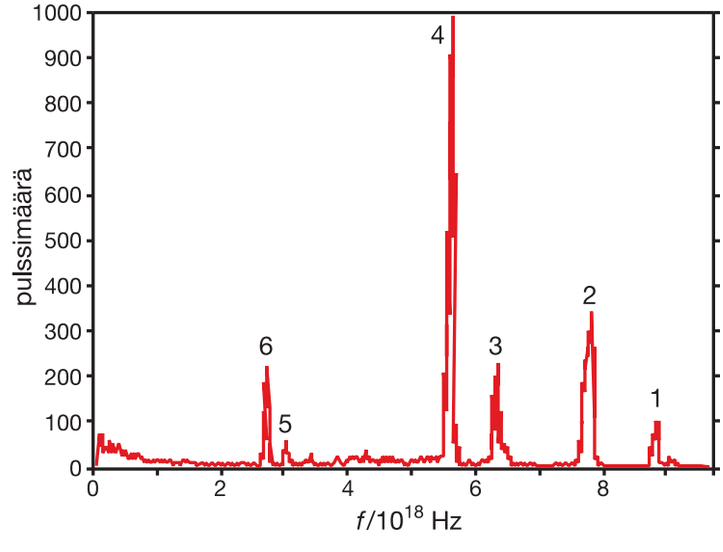
Arvokkaiden taulujen aitous voidaan tutkia PIXE-menetelmällä. Taulua pommitetaan hiukkaskiihdyttimestä saatavalla ionisuihkulla, jolloin taulun väriaineiden atomit virittyvät. Kun viritystilat purkautuvat, kyseiset väriaineet lähettävät niille ominaista ominaissäteilyä. Näin saadaan selville taulun maalaamisessa käytettyjen väriaineiden alkuaineet. Kun tiedetään, milloin aito teos on maalattu ja minkälaisia maaleja silloin on ollut käytössä, voidaan paljastaa nykyaikaisilla synteettisillä maaleilla tehty väärennös. Usein väärennökset näyttävät silmämääräisesti tarkasteltuna täysin aidoilta teoksilta.

Jos esimerkiksi ulkoilmaa imetään suodattimen läpi ja suodattimeen kohdistetaan elektronisuihku, kuten röntgenputkessa, suodattimen likatahrojen ominaissäteilystä saadaan selville, onko ulkoilmassa lyijyä. Ominaissäteilyn piikkien paikka paljastaa lyijyn olemassaolon, ja piikin korkeus antaa tietoa siitä, kuinka paljon lyijyä on katuilmassa. Ominaissäteilyn avulla voidaan tutkia esimerkiksi liikenteen ja teollisuuden päästöjä tai veren alkuainekoostumusta.

Röntgensäteily soveltuu myös mm. muinaislöytöjen tutkimiseen ennen löydettyjen kappaleiden puhdistamista. Kappaleiden rakenne voidaan tutkia koskematta itse kappaleeseen. Näytteen, vaikkapa likatahran, alkuainekoostumus voidaan selvittää sen lähettämän ominaissäteilyn perusteella. Ominaissäteilyn röntgenpiikit saadaan näkyville myös, jos kohtioainetta säteilytetään hiukkasten sijasta riittävän suurienergiaisella röntgensäteilyllä. Tätä alkuaineen tunnistamismenetelmää kutsutaan **röntgenfluoresenssiksi**.

Esimerkki 1

Röntgenfluoresenssianalyysi on eräs käytännöllisimmistä menetelmistä näytteen alkuainekoostumuksen määrittämisessä. Tutkittaessa kaupallisten vesivärien mahdollista myrkyllisyyttä mitattiin punaisesta vesivärinapista kuvan mukainen röntgenfluoresenssispektri. Päättele spektrin ja oheisen taulukon avulla, mitä alkuaineita vesivärinapista paljastui. [K2010, 9 (osa)]



Eräitä K-ominaissäteilyn energioita

Alkuaine	E_{K_α}/keV	E_{K_β}/keV
Fe	6,4	7,0
Cu	8,0	8,9
As	10,5	11,7
Se	11,2	12,5
Mo	17,4	19,6
Ag	22,1	24,9
Cd	23,2	26,1
Sn	25,2	28,5
Ba	32,2	36,3
Ce	34,6	39,3

$h = 4{,}135669 \cdot 10^{-15}$ eVs

Valokvantin, joka syntyy atomin viritystilan purkautuessa eli elektronin siirtyessä ylemmältä energiatilalta alemmalle, energia voidaan laskea fotonin taajuuden avulla, $E = hf$.

Esimerkiksi piikin 1 synnyttäneiden fotonien energia on

$$E = hf = 4{,}135669 \cdot 10^{-15}\ \text{eVs} \cdot 8{,}8 \cdot 10^{18}\ 1/\text{s} \approx 36{,}4\ \text{keV}.$$

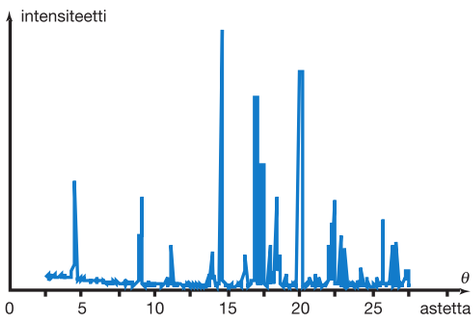
Vastaavasti lasketaan muita piikkejä vastaavien fotonien energiat. Taulukossa siirtymä K_α tarkoittaa elektronin siirtymistä tilalta 2 tilalle 1 ja siirtymä K_β siirtymistä tilalta 3 tilalle 1.

Piikki	Taajuus $f/10^{18}$ Hz	Energia E/keV	Alkuaine ja siirtymä
1	8,8	36,4	Ba, K_β
2	7,8	32,3	Ba, K_α
3	6,3	26,1	Cd K_β
4	5,6	23,2	Cd, K_α
5	3,0	12,4	Se, K_β
6	2,7	11,2	Se, K_α

Kaikki lasketut fotonien energiat eivät täysin vastaa taulukossa annettuja energioiden arvoja. Ero johtuu piikkien taajuuksien arvojen lukemisen epätarkkuudesta.

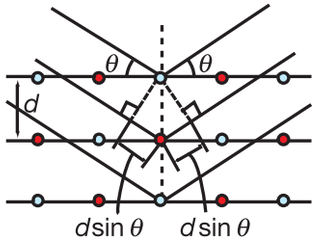
Energioista voidaan päätellä, että vesivärinapista paljastui barium, kadmium ja seleeni.

Aineen kiderakenteen tutkimisessa röntgenlaite on tärkeä tutkimusväline. Kiteisen aineen atomit ovat asettuneet säännölliseen järjestykseen, kidetasoiksi. Röntgensäteilyn aallonpituus on samaa suuruusluokkaa kuin kidetasojen etäisyydet toisistaan. Tämän ansiosta kiteisen aineen rakennetta voidaan tutkia **röntgendiffraktiota** käyttäen. Samalla menetelmällä saadaan selville aineen kiderakenne ja kidehilassa olevat virheet sekä voidaan tutkia aineessa esiintyviä jännityksiä.



Suomenlinnan vanhan tiilirakennuksen seinää rapauttavasta suolasta muodostui oheinen diffraktiospektri. Suolan koostumukseksi saatiin spektrin perusteella $Na_2CO_3 \cdot NaHCO_3 \cdot H_2O$. Lähde: Helsingin yliopisto, fysiikan laitos.

Röntgensäteilykvantit siroavat hiukkassäteilyn tavoin kiteen rakenneosasista. Kun kidettä säteilytetään röntgensäteilyllä, tiettyihin suuntiin heijastuneet säteet vahvistavat toisiaan voimakkaasti. Maksimit syntyvät, kun kiteestä diffraktoitunut säteily interferoi. Vahvistussuunnista saadaan tietoa kiteen muodosta, esimerkiksi siitä, onko kide kuution muotoinen. Diffraktiomaksimin intensiteetti antaa tietoa atomin paikasta kiteessä.



Säteiden matkaero on $2d\sin\theta$.

Viereisessä piirroksessa on esitetty röntgensäteiden heijastuminen kiteen päällekkäisiltä tasoilta. Jos kidetasojen välimatka on d, päällekkäisiltä tasoilta heijastuneiden säteiden matkaero on $d\sin\theta + d\sin\theta = 2d\sin\theta$. Kulma θ on kulma, jonka tuleva säde muodostaa kidetason kanssa. Heijastuneet säteet vahvistavat toisiaan voimakkaasti (diffraktiomaksimi), jos ne ovat samanvaiheisia. Ne ovat samanvaiheisia, jos säteiden matkaero on jokin kokonaisen aallonpituuden monikerta eli $n\lambda$.

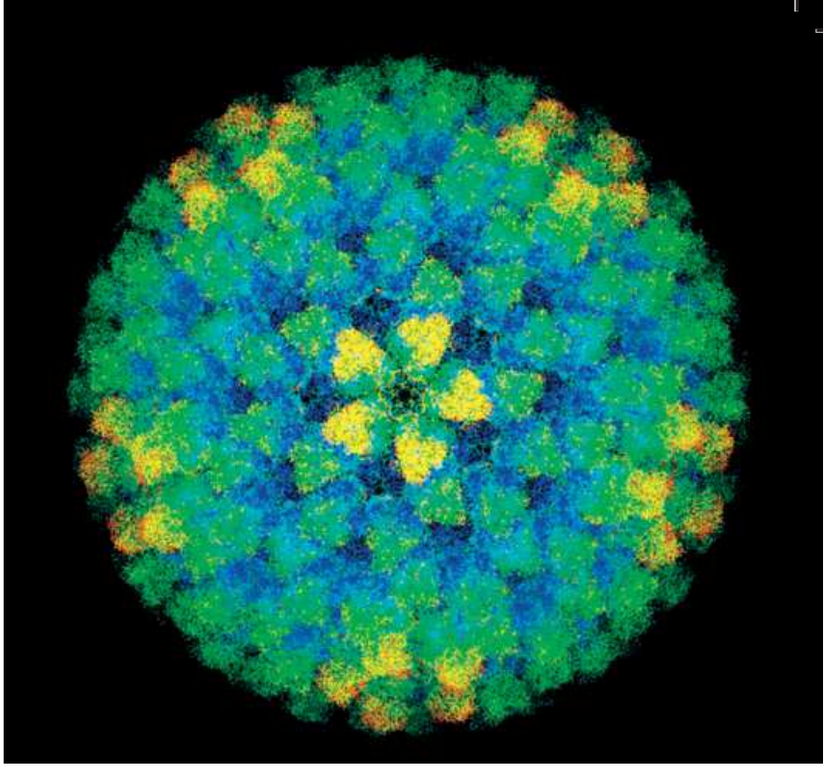
Braggin laki
Röntgensäteily heijastuu kiteen tasoista lain

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

määräämiin suuntiin θ. Laissa $n = 1, 2, \ldots$ on heijastuksen (diffraktion) kertaluku ja λ säteilyn aallonpituus. Kidetasojen välimatka on d.

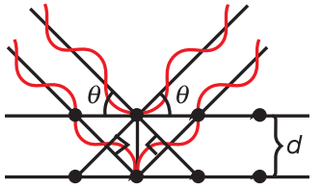
William Lawrence Bragg (1890–1971) oli englantilainen fyysikko. Hänen isänsä oli *William Henry Bragg* (1862–1942). He loivat yhdessä pohjan röntgenkristallografialle eli tekniikalle, jonka avulla voidaan selvittää esimerkiksi molekyylin kolmiulotteinen rakenne. W. H. Bragg esitti Braggin lain vuonna 1915.

Röntgensäteilyn aallonpituuskaistasta voidaan erottaa haluttu aallonpituus Braggin lakia hyödyntämällä. Jos tutkimustyössä tarvitaan täsmälleen tiettyä röntgensäteilyn aallonpituutta, valitaan tunnettu kide ja yksi siitä tiettyyn kulmaan heijastunut säde (diffraktiomaksimi). Röntgenkristallografiaa käytetään aineen tutkimuksessa hyvin monimutkaisten rakenteiden selvittämiseen. Tärkeimpänä röntgenkristallografian saavutuksena pidetään usein tutkijoiden *Rosalind Franklin* (1920–1958), *Maurice Wilkins* (1916–2004), *James D. Watson* (s. 1928) ja *Francis Crick* (1916–2004) tekemää työtä DNA-molekyylin rakenteen selvittämiseksi.



Röntgenkristallografiakuvat DNA-molekyylistä ja bluetongue-viruksesta. Virus aiheuttaa sinikielitautia mm. märehtijöille.

Esimerkki 2



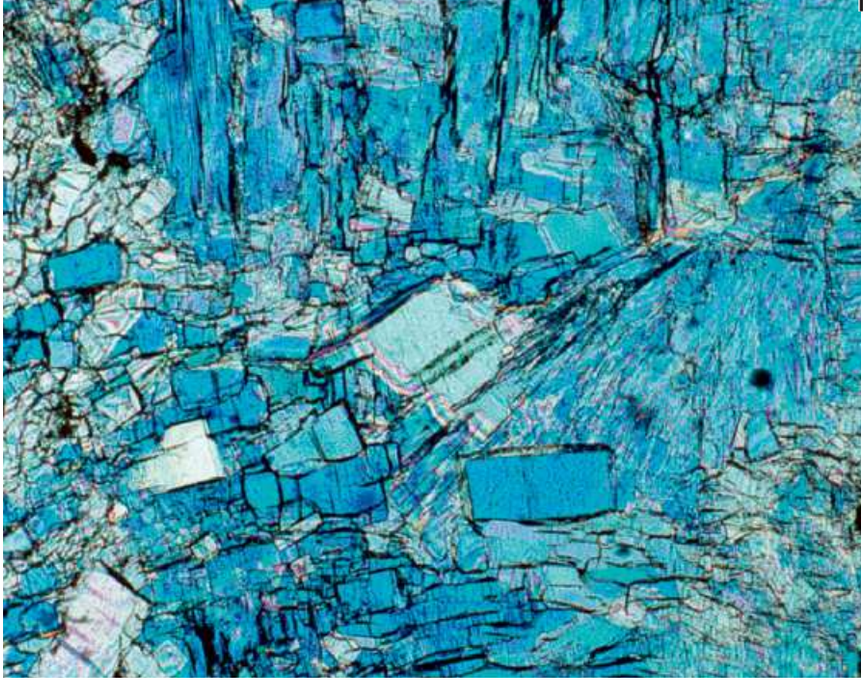
Kiteestä heijastuvien röntgensäteiden aallonpituus on $1{,}69 \cdot 10^{-10}$ m. Ensimmäisen kertaluvun diffraktiomaksimi on 35°:n kulmassa kiteen pintaan nähden. Laske kiteen atomitasojen välinen etäisyys.

$\lambda = 1{,}69 \cdot 10^{-10}$ m, $\quad n = 1, \quad \theta = 35°$

Braggin laista $2d\sin\theta = n\lambda$ saadaan atomitasojen väliseksi etäisyydeksi

$$d = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} = \frac{1 \cdot 1{,}69 \cdot 10^{-10}\ \text{m}}{2 \cdot \sin 35°} \approx 1{,}5 \cdot 10^{-10}\ \text{m}.$$

Atomitasojen välinen etäisyys on $1{,}5 \cdot 10^{-10}$ m.



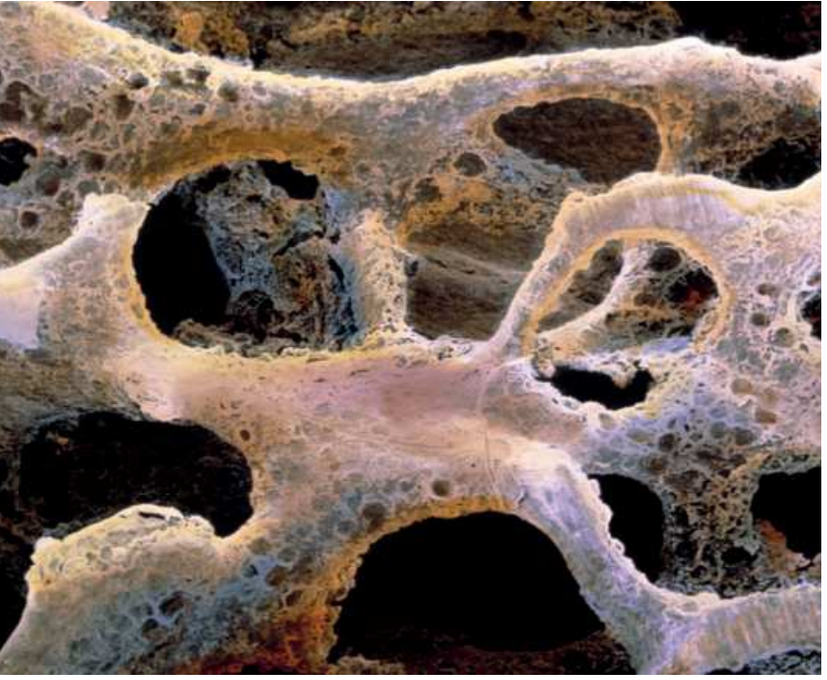
Kipsikiteitä kuvattuna optisella mikroskoopilla ja elektronimikroskoopilla.

3.3 Mikroskoopit aineen rakenteen tutkimuksessa

Mikroskooppeja alettiin käyttää aineen rakenteen tutkimuksessa 1600-luvun loppupuolella. **Optisen mikroskoopin** erotuskykyä rajoittaa käytettävän valon aallonpituus. Optisella mikroskoopilla voidaan erottaa ainoastaan yksityiskohtia, jotka ovat valon aallonpituutta suurempia. Optinen mikroskooppi voi suurentaa kohteen parhaimmillaan noin tuhatkertaiseksi.

Elektronimikroskopia on tutkimusmenetelmänä mullistanut aineen rakenteen tutkimusta. Elektronimikroskopian perustan muodostavat de Broglien teoria ja elektronien ohjaaminen magneettikentässä käämien magneettikentillä, ns. magneettilinsseillä. Elektronimikroskoopin erotuskyky (noin 1 nm) on merkittävästi parempi kuin optisen mikroskoopin erotuskyky, koska de Broglien aallonpituus on huomattavasti pienempi kuin näkyvän valon aallonpituus. Erotuskyvyn määräävät käytettävä kiihdytysjännite ja elektronien aallonpituus. Elektronimikroskooppia käytetään mm. lääketieteessä ja nanotekniikan tutkimuksissa.

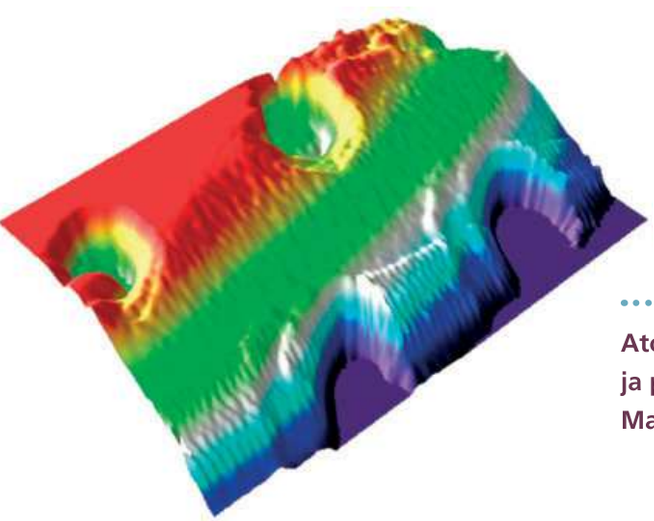
Pyyhkäisyelektronimikroskoopissa (SEM, *Scanning Electron Microscope*) kuvanmuodostuksessa käytettävä elektronisuihku pyyhkäisee näytteen pintaa piste pisteeltä. Kun elektronisuihku osuu näytteeseen, osa elektroneista siroaa, osa absorboituu näyt-



Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla otetut kuvat osteoporoosin heikentämästä luustosta sekä sileästä maalipinnasta.

teeseen ja osa menee läpi, jos näyte on hyvin ohut. Mikroskooppi muodostaa kuvan kohteen pintarakenteesta elektronien ja kohteen pintakerroksen atomien välisten vuorovaikutuksien perusteella. Pyyhkäisyelektronimikroskoopin suurennus on parhaimmillaan 200 000-kertainen optiseen mikroskooppiin verrattuna.

Atomivoimamikroskoopissa (AFM, *Atomic Force Microscope*) näytteen pintaa tutkitaan värähtelijään kiinnitetyllä terävällä neulalla, jonka kärki on vain muutaman nanometrin levyinen. Neulaa ja näytettä liikutellaan toistensa suhteen. Atomivoimamikroskoopilla voidaan havaita näytteen pinnassa nanometrin korkeusvaihtelut. Erotuskyky riippuu neulan koosta.



Atomivoimamikroskoopin avulla päästään erittäin suuriin suurennoksiin ja parhaimmillaan saadaan näkyviin jopa yksittäiset atomit. Kuvassa on Marsista löytynyt pölyhiukkanen.

Tehtäviä

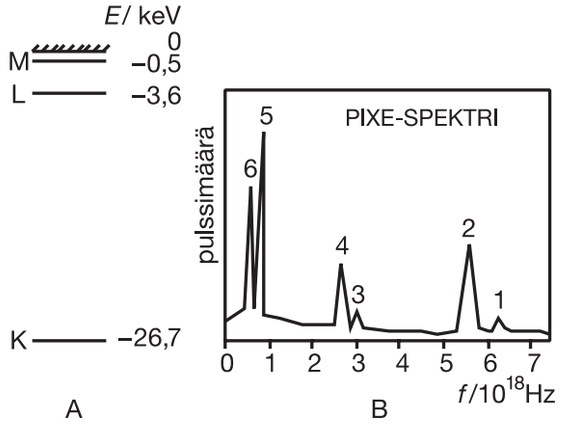
3-15. a) Röntgenkuvaustekniikka on esimerkki fysiikan tutkimustiedon hyvin nopeasta siirtymisestä sovelluskäyttöön. Milloin Röntgen keksi säteet, ja milloin röntgenkuvausta alettiin käyttää lääketieteessä?
b) Miksi röntgenkuvassa erotetaan luut mutta ei lihaksia?
c) Röntgenkuvaa otettaessa osa röntgenputken lähettämästä spektristä suodatetaan pois ennen säteilyn osumista potilaaseen. Miksi näin menetellään?
d) Mihin röntgenkuvausta tarvitaan metallipajoissa ja telakoilla?

3-16. a) Selvitä läpäisyelektronimikroskoopin toimintaperiaate.
b) Miten elektronimikroskooppien hiukkassuihkun kiihdytysjännite vaikuttaa siihen, minkä kokoisia kohteita laitteilla voidaan tutkia?

3-17. a) Ns. perinteinen valomikroskopia perustuu valon kulkuun näytteen (solujen) läpi. Miksi solunäytteitä usein värjätään?
b) Miksi elektronimikroskoopilla voidaan erottaa pienempiä yksityiskohtia kun optisella mikroskoopilla?
c) Solunäytteitä voidaan tutkia myös sentrifugin avulla. Miksi hyvin nopeasti pyörivässä sentrifugissa virukset saadaan eroteltua proteiinista?

3-18. Kiteisen aineen kidetasojen välinen etäisyys on 89 pm. Kiteeseen suunnataan röntgensäteilyä, jonka aallonpituus on $1{,}4 \cdot 10^{-10}$ m. Ensimmäisen kertaluvun diffraktiomaksimi näkyy suunnassa
1) 4,5° 2) 0,045° 3) 52° 4) 57°.

3-19. Raskaan alkuaineen atomissa on sisimmän elektronikuoren (K-kuoren) elektroneilla keskenään sama energia kuin vastaavasti seuraavien kuorien eli L- ja M-kuoren elektroneilla (likimäärin). Kuva A esittää kadmiumatomin elektronien yksinkertaistettua energiatasokaaviota. Kuvassa B on PIXE-spektri, joka on syntynyt kiihdytetyn protonisuihkun osuessa vanhaksi väitetyn taidemaalauksen pinnassa olevaan väriaineeseen. Spektrin perusteella väriaine osoittautui kadmiumpunaiseksi, mikä paljasti taulun tällä vuosisadalla maalatuksi. Mitkä spektrin piikeistä kertovat näytteen sisältävän kadmiumia? Sijoita näitä vastaavat siirtymät energiatasokaavioon.



3-20. Aineen kiderakennetta voidaan tutkia energialtaan sopivien elektronien ja Braggin lain avulla. Amerikkalaiset Davisson ja Germer pommittivat kuuluisassa kokeessaan vuonna 1927 nikkelikidettä elektroneilla, joiden liikeenergia oli 54 eV. He mittasivat ensimmäisen kertaluvun heijastuskulmaksi 65°. Mikä on tätä vastaava nikkelin kiteiden atomitasojen välimatka d?

Testaa, osaatko

Oikeita vaihtoehtoja voi olla yksi tai useampia.

1. Mitkä vaihtoehdoista pitävät paikkansa?
a) Spektri on säteilyn intensiteetin aallonpituus- tai taajuusjakauma.
b) Spektri voi olla jatkuva tai viivaspektri.
c) Kaikki kappaleet emittoivat sähkömagneettista säteilyä, kun niiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella.

2. Mitkä vaihtoehdoista pitävät paikkansa?
a) Emissiospektri syntyy, kun aine emittoi sähkömagneettista säteilyä.
b) Emissiospektri voi olla jatkuva tai viivaspektri.
c) Absorptiospektristä puuttuvat ne aallonpituudet, jotka ovat kaasun emissiospektrissä.

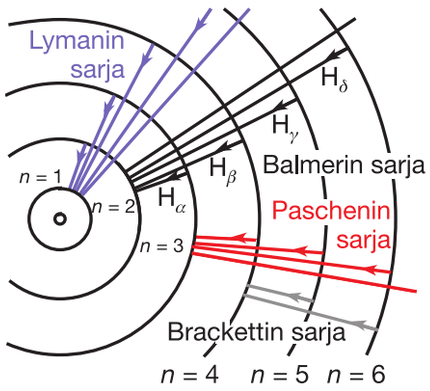
3. Mitkä vaihtoehdoista pitävät paikkansa?
a) Kaasun kaikki emissiospektrin spektriviivat näkyvät kaasun absorptiospektrissä, mutta kaikki absorptiospektrin viivat eivät näy emissiospektrissä.
b) Kaasun kaikki absorptiospektrin spektriviivat näkyvät kaasun emissiospektrissä, mutta kaikki emissiospektrin viivat eivät näy absorptiospektrissä.
c) Spektriviivat ovat emissio- ja absorptiospektrissä samojen aallonpituuksien kohdalla.

4. Kiinteän aineen spektri on
a) viivaspektri
b) jatkuva spektri
c) vyöspektri.

5. Vetyatomin spektrissä Balmerin sarjan suurin aallonpituus on
a) 122 nm
b) 486 nm
c) 656 nm.

6. Mitkä seuraavista väitteistä ovat totta?
a) Auringosta tuleva valon spektri on jatkuva.
b) Meistä loittonevan tähden säteilyn spektriviivat siirtyvät kohti spektrin pitkäaaltoista päätä.
c) Tähden lämpötila vaikuttaa tähden säteilyn spektriin ja siihen, minkä väriseltä tähti näyttää.

7. Vetyatomin spektrisarjassa pienimmät aallonpituudet ovat
a) Balmerin sarjassa
b) Lymanin sarjassa
c) Paschenin sarjassa.



8. Mitkä vaihtoehdoista pitävät paikkansa?
a) Röntgensäteilyn aallonpituuskaistasta voidaan erottaa haluttu aallonpituus Braggin lakia hyödyntämällä.
b) Optisen mikroskoopin erotuskykyä rajoittaa käytettävän valon aallonpituus.
c) Pyyhkäisyelektronimikroskooppi muodostaa kuvan kohteen pintarakenteesta elektronien ja kohteen pintakerroksen atomien välisten vuorovaikutuksien perusteella.

Tiivistelmä

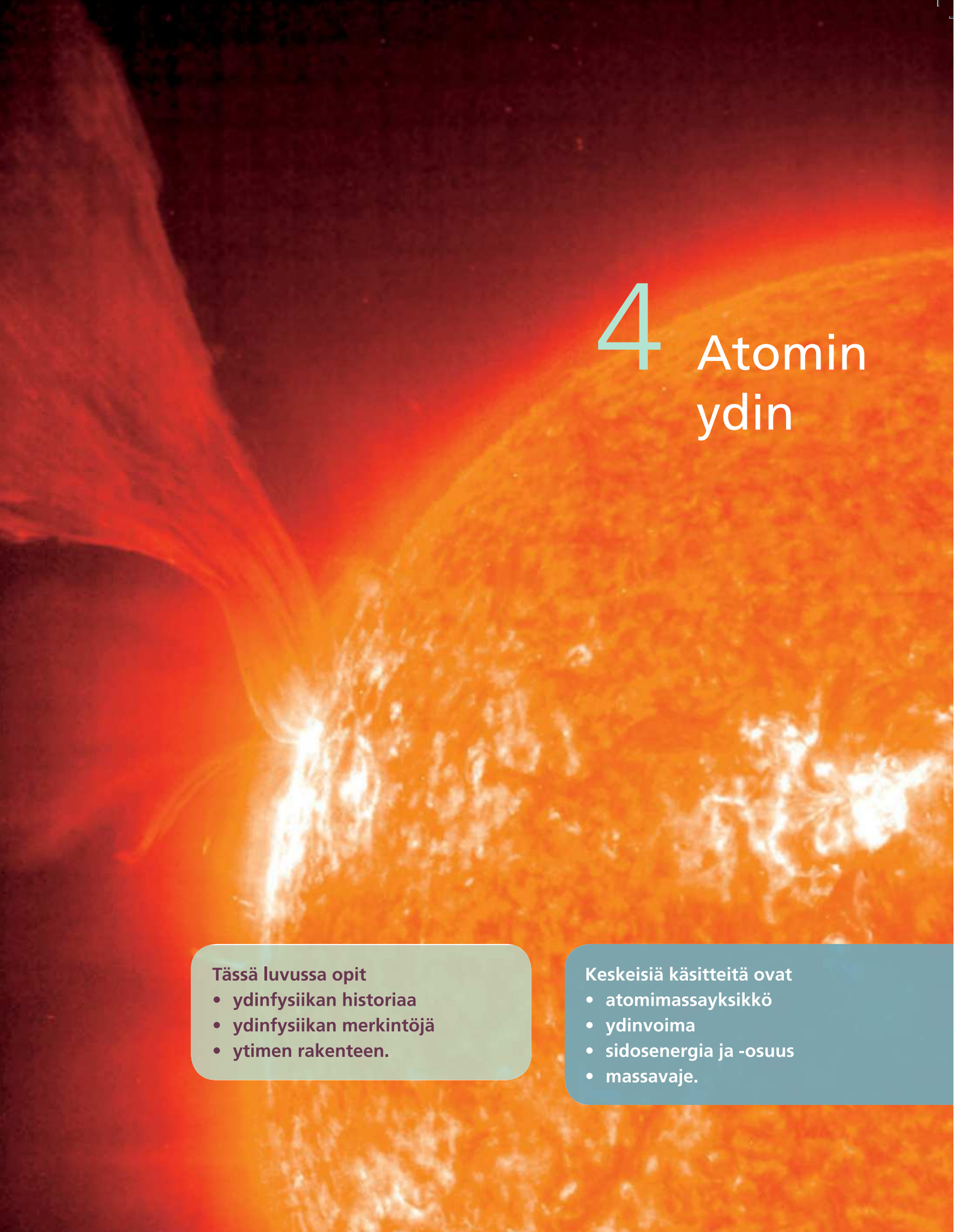
- Spektri on säteilyn intensiteetin aallonpituus- tai taajuusjakauma. Spektri voi olla jatkuva tai viivaspektri.

- Emissiospektri syntyy, kun aine emittoi sähkömagneettista säteilyä. Emissiospektri voi olla jatkuva tai viivaspektri.

- Absorptiospektri syntyy, kun kaasu absorboi sähkömagneettista säteilyä. Spektriviivat ovat emissio- ja absorptiospektrissä samojen aallonpituuksien kohdalla.

- Vetyatomin spektrin viivoja vastaavat aallonpituudet saadaan yhtälöstä $\frac{1}{\lambda} = R_{\mathrm{H}}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$, jossa R_{H} on Rydbergin vakio ja $n = 1, 2, 3, \ldots$ sekä $m = n + 1, n + 2, \ldots$

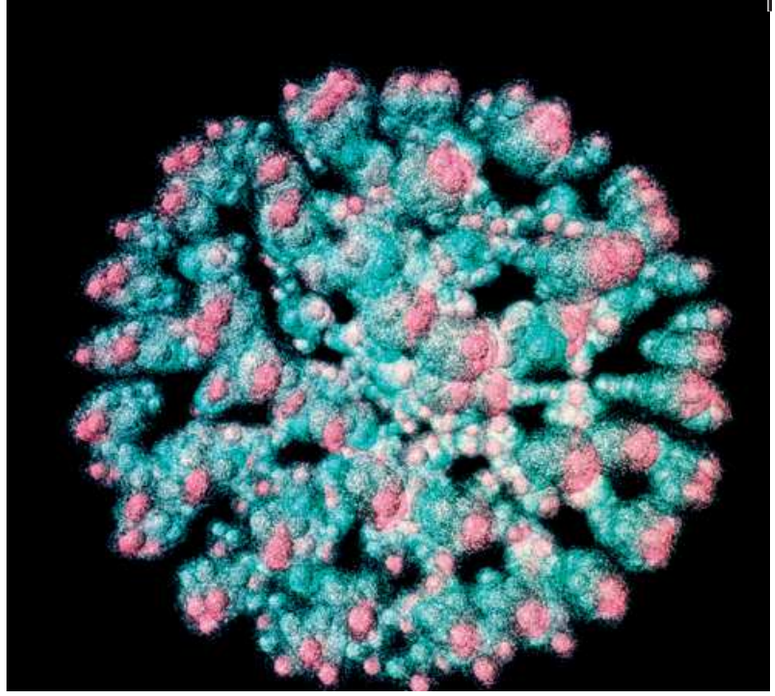
- Braggin laki: Röntgensäteily heijastuu kiteen tasoista lain $2d\sin\theta = n\lambda$ määräämiin suuntiin θ. Laissa $n = 1, 2, \ldots$ on heijastuksen (diffraktion) kertaluku ja λ säteilyn aallonpituus. Kidetasojen välimatka on d.



4 Atomin ydin

Tässä luvussa opit
- ydinfysiikan historiaa
- ydinfysiikan merkintöjä
- ytimen rakenteen.

Keskeisiä käsitteitä ovat
- atomimassayksikkö
- ydinvoima
- sidosenergia ja -osuus
- massavaje.



Kuumailmapallon halkaisija on noin 10 m. Jos atomi olisi kuumailmapallon kokoinen, ytimen halkaisija olisi 1 mm. Raskain luonnossa pysyvänä esiintyvä ydin on uraani.

4.1 Ytimen rakenne

Ernest Rutherfordin sirontakoe paljasti ytimen olemassaolon. Ydin on hyvin pienikokoinen, sillä sen halkaisija ($\approx 10^{-14}$ m) on vain kymmenestuhannesosa atomin halkaisijasta ($\approx 10^{-10}$ m). Ytimen rakenneosien, protonien ja neutronien, yhteisnimitys on **nukleoni**. Protonien (p^+) ja varauksettomien neutronien (n) massat ovat lähes yhtä suuret. Atomin massa on lähes kokonaan (yli 99 %) atomin ytimessä.

Ytimen ominaisuudet riippuvat sen protonien ja neutronien lukumäärästä. Alkuaineen ydintä kuvattaessa kerrotaan, kuinka monta protonia ja kuinka monta neutronia siinä on. Ytimen tunnukseen eli alkuaineen kemialliseen merkkiin liitetään massaluku A (ytimessä olevien nukleonien lukumäärä eli protonien ja neutronien yhteismäärä) ja järjestysluku (varausluku) Z (ytimessä olevien protonien lukumäärä) ytimen tarkan rakenteen ilmaisemiseksi.

Ytimen rakenteen kuvaaminen

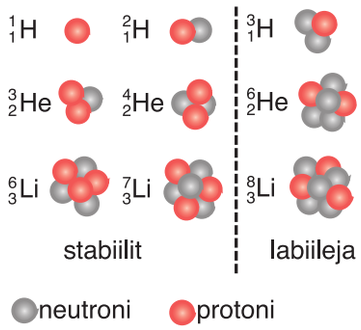
Atomin ydintä kuvataan symbolilla ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$, jossa X on alkuaineen kemiallinen merkki, Z järjestysluku ja A massaluku.

$A = Z + N$, jossa N on neutroniluku eli ytimessä olevien neutronien lukumäärä.

Esimerkiksi merkintä $^{197}_{79}\mathrm{Au}$ tarkoittaa kultaydintä, jonka massaluku on 197 ja järjestysluku 79. Neutroniluku on $N = 197 - 79 = 118$. Usein ydintä kuvataan ilmoittamalla alkuaineen tunnuksen lisäksi vain massaluku, esimerkiksi $^{197}\mathrm{Au}$ tai Au-197.

Protonien lukumäärä tietyn alkuaineen ytimissä on aina sama, mutta neutronien määrä voi vaihdella. Niitä ytimiä, joilla on eri neutroniluku, kutsutaan kyseisen alkuaineen **isotoopeiksi**. Koska alkuaineen atomin elektroniverhon rakenne riippuu vain protonien määrästä ytimessä eikä neutronien määrästä, kaikilla saman alkuaineen isotoopeilla on samanlaiset kemialliset ominaisuudet. Siksi isotooppeja ei voi erotella toisistaan kemiallisin menetelmin, esimerkiksi kemiallisten reaktioiden avulla. Alkuaineiden ytimiä ja niiden eri isotooppeja kutsutaan **nuklideiksi**.

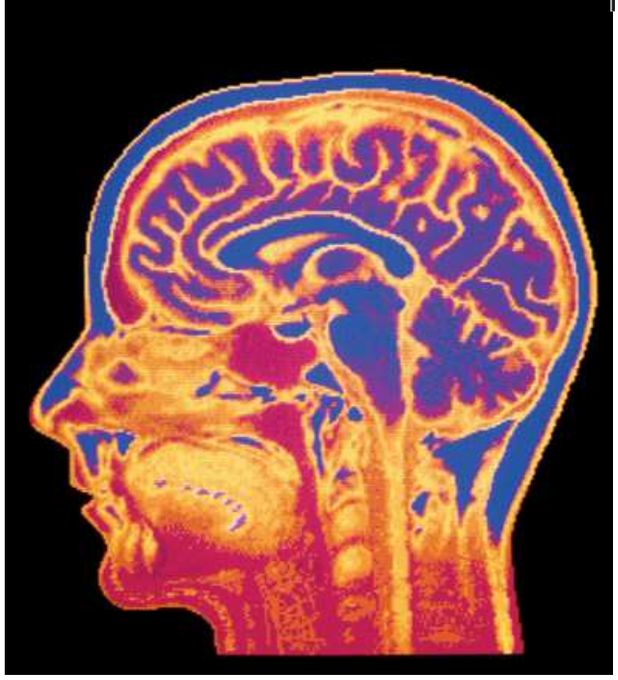
Vain tietyt protonien ja neutronien yhdistelmät voivat muodostaa ytimiä. Kullakin alkuaineella on sekä pysyviä (stabiileja) että pysymättömiä (epästabiileja) isotooppeja. Pysymättömiä isotooppeja kutsutaan **radioaktiivisiksi** isotoopeiksi. Ne lähettävät hajotessaan sähkömagneettista säteilyä tai hiukkassäteilyä.



Joitakin vedyn, heliumin ja litiumin isotooppien ytimien piirrosmalleja.

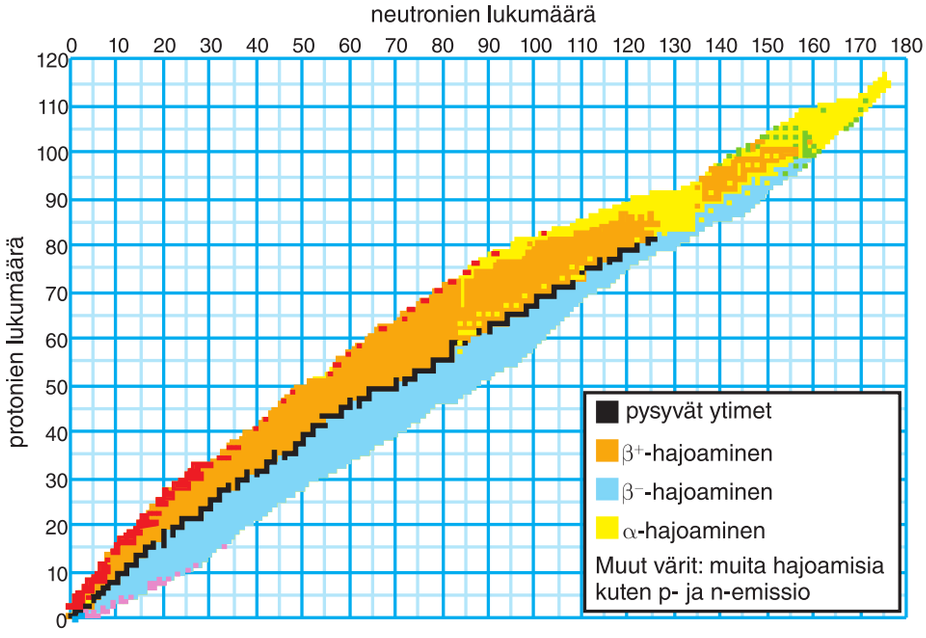
Esimerkiksi hiilellä on kaksi pysyvää isotooppia: $^{12}_{6}\mathrm{C}$, jonka suhteellinen runsaus luonnossa on 98,89 %, ja $^{13}_{6}\mathrm{C}$, jonka suhteellinen runsaus on 1,11 %. Lisäksi hiilellä on kolme radioaktiivista isotooppia, $^{11}_{6}\mathrm{C}$, $^{14}_{6}\mathrm{C}$ ja $^{15}_{6}\mathrm{C}$.

Taulukkokirjan isotooppitaulukossa annetaan alkuaineiden yleisimpien eri isotooppien tunnetut suhteelliset runsaudet. Esimerkiksi uraanilla on useita radioaktiivisia isotooppeja, mutta $^{234}\mathrm{U}$:n, $^{235}\mathrm{U}$:n ja $^{238}\mathrm{U}$:n isotooppien suhteelliset runsaudet ovat yhteensä likimain 100 %.

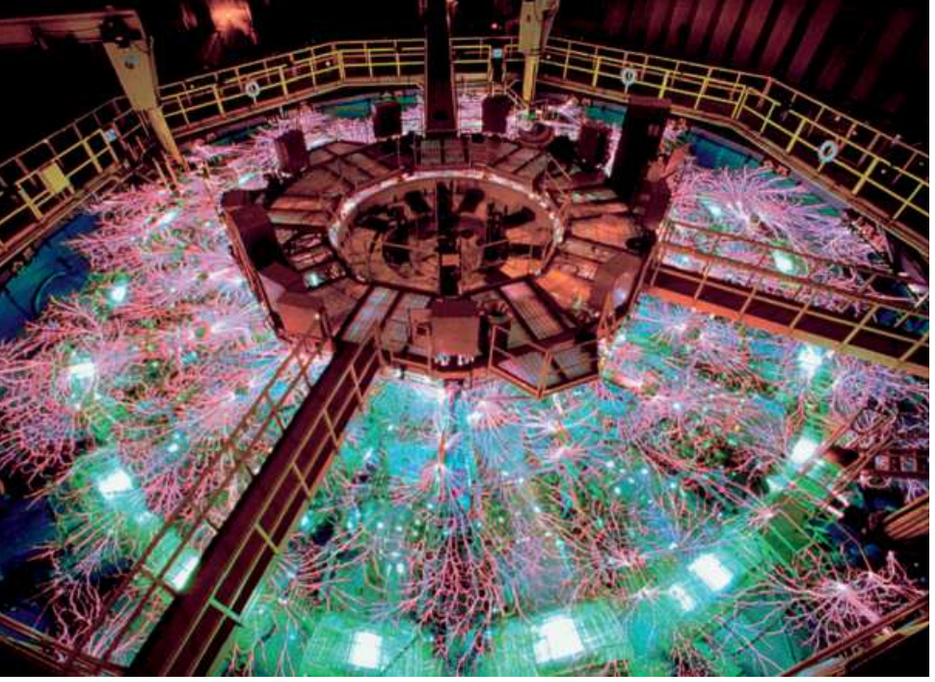


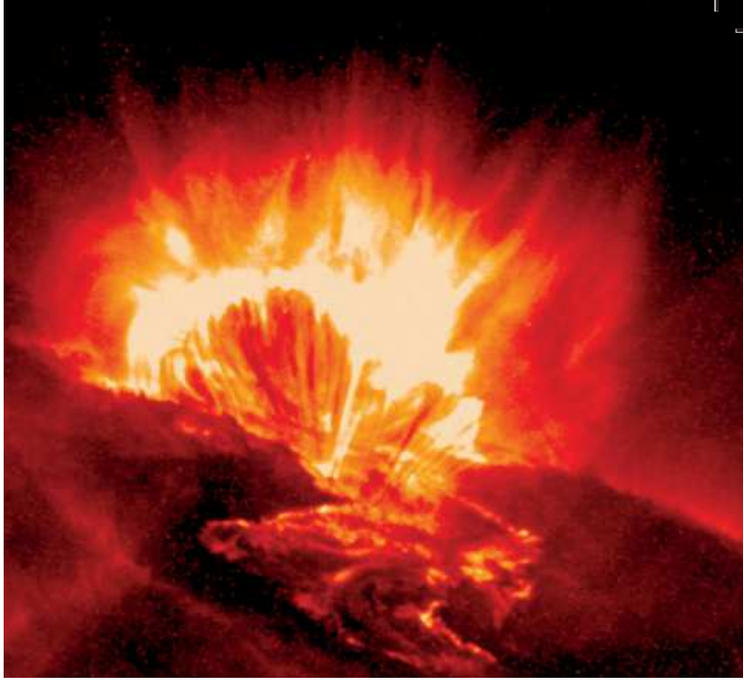
Ydinmagneettinen resonanssi antaa tietoa aineen rakenteesta. Tämä pohjautuu siihen, että ympäröivä aine vaikuttaa ydinten käyttäytymiseen magneettikentässä. Lääketieteessä käytetty magneettikuvaus perustuu ydinmagneettiseen resonanssiin. Kuvassa on MRI-kuva (*Magnetic Resonance Image*) normaaleista aivoista.

Nykyään (vuonna 2011) tunnetaan 118 alkuainetta. Niillä on yhteensä noin 260 pysyvää isotooppia ja yli 3 000 radioaktiivista isotooppia. Uusia isotooppeja tuotetaan törmäyttämällä tunnettuja isotooppeja hiukkasilla tai toisilla ytimillä.



Vain tietyt protonien ja neutronien yhdistelmät voivat muodostaa ytimiä. Musta väri kuvaa pysyviä isotooppeja ja muut värit radioaktiivisia isotooppeja. Raskain pysyvä alkuaine luonnossa on uraani, sitä raskaammat ovat hajoavia.





Fuusiossa kevyet ytimet pääsevät niin lähelle toisiaan, että vahva vuorovaikutus sitoo ne yhdeksi ytimeksi. Auringon energiantuotanto perustuu fuusioon. Esimerkiksi aurinkopaneelit hyödyntävät Auringon ydinreaktioissa syntyvää säteilyä.

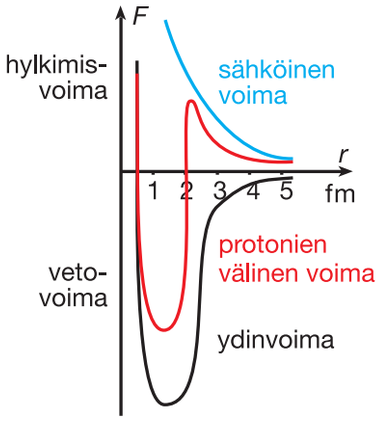
4.2 Ydinvoima

Maailmankaikkeuden rakenne voidaan selittää alkeishiukkasten ja neljän niiden välillä tapahtuvan perusvuorovaikutuksen avulla. Kahden hiukkasen välisen vuorovaikutuksen välittää välittäjähiukkanen. Yksi perusvuorovaikutuksista on **vahva vuorovaikutus**. Vahva vuorovaikutus tapahtuu ytimessä protonien ja neutronien rakenneosasten, kvarkkien, välillä. Sen välittäjiä kutsutaan gluoneiksi.

Kvarkeilla on niiden sähkömagneettisiin vuorovaikutuksiin liittyvän sähkövarauksen lisäksi myös toisenlainen varaus, jota kutsutaan värivaraukseksi tai väriksi. Vahva vuorovaikutus ilmenee värivarauksellisten hiukkasten välillä vaikuttavana voimana, ns. **vahvana voimana**, joka sitoo kvarkit toisiinsa.

Ytimessä protonien välillä on sähköinen hylkimisvoima. Kvarkkien välinen vahva voima vaikuttaa hieman nukleonin ulkopuolellekin, ja tämä jäännösvoima sitoo nukleonit toisiinsa: ydin pysyy koossa. **Ydinvoimaksi** kutsutaan perinteisesti nukleonien välistä voimaa, joka siis on perimmältään vahvan vuorovaikutuksen aiheuttama.

Vahva vuorovaikutus ja ydinvoima
Vahva vuorovaikutus tapahtuu kvarkkien välillä.
Ytimessä nukleonien välillä vallitsevaa voimaa nimitetään ydinvoimaksi. Se on vahvan vuorovaikutuksen aiheuttama.



Kuvassa on esitetty kahden protonin väliset voimat niiden keskipisteiden välisen etäisyyden funktioina. Punainen kuvaaja on sähköisen voiman ja ydinvoiman summakuvaaja.

Ydinvoiman kantama on lyhyt, noin 2 fm. Ydinvoima on voimakas hylkimisvoima, jos kahden nukleonin välinen etäisyys on pienempi kuin 0,4 fm. Tämä voima estää nukleoneja koskettamasta toisiaan. Jos etäisyys on 0,4–2 fm, ydinvoima on voimakas vetovoima. Jos nukleonien välinen etäisyys on suurempi kuin 2 fm, ydinvoima heikkenee nopeasti etäisyyden kasvaessa.

Ydinvoima vaikuttaa nukleonien välillä yhtä suurena nukleonilajista riippumatta. Neutroni on kuitenkin sitoutunut ytimeen vahvemmin kuin protoni, koska protoniin vaikuttaa myös sähköinen hylkimisvoima. Kahden vierekkäin olevan protonin välinen ydinvoima on kuitenkin merkittävästi voimakkaampi kuin sähköinen hylkimisvoima. Nukleonin halkaisija on likimain 1 fm ja ydinvoiman kantama noin 2 fm. Siksi ytimen vastakkaisilla puolilla olevien nukleonien välisellä ydinvoimalla ei – kevyimpiä ytimiä lukuun ottamatta – ole merkitystä.

Atomimassayksikkö

Koska atomien massat ovat hyvin pieniä, ydinfysiikassa atomin massan yksikkönä käytetään yleensä **atomimassayksikköä** (1 u). Määritelmän mukaan atomimassayksikkö on kahdestoistaosa ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$-isotoopin atomin massasta. Tasan 12 grammaa tätä hiiliisotooppia sisältää ainemäärän yksikön, 1 moolin, verran hiiltä, ja 1 mooli sisältää määritelmän mukaan Avogadron luvun N_A ilmoittaman määrän hiiliatomeja, $N_\mathrm{A} = 6{,}0221367 \cdot 10^{23}$. Atomimassayksikkö on kilogrammoina

$$1\ \mathrm{u} = \frac{1}{12} m\left({}^{12}_{6}\mathrm{C}\right) = \frac{1}{12} \cdot \frac{12\ \mathrm{g}}{N_\mathrm{A}} = \frac{1}{12} \cdot \frac{12\ \mathrm{g}}{6{,}0221367 \cdot 10^{23}}$$
$$= 1{,}6605402 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}.$$

Nukleonien ja elektronin massat

Hiukkanen	m/kg	m/u
protoni	$1{,}6726231 \cdot 10^{-27}$	1,0072765
neutroni	$1{,}6749286 \cdot 10^{-27}$	1,0086650
elektroni	$9{,}1093897 \cdot 10^{-31}$	$0{,}0005485790 = 5{,}4857990 \cdot 10^{-4}$

$$1\ \mathrm{u} = 1{,}6605402 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

Massa ja energia

Albert Einstein otti suhteellisuusteoriassaan käyttöön aineen **sisäisen energian** käsitteen. Sisäinen energia on aineen massaan sisältyvää energiaa. Massa on yksi sidotun energian muoto. Sisäinen energia on otettava huomioon, kun tarkastellaan energian säilymistä ydinreaktioissa.

Massan ja energian vastaavuus
Massaan m sisältyy sisäinen energia $E = mc^2$, jossa c on valon nopeus tyhjiössä.

Yhtä atomimassayksikköä vastaava energia on

$$\begin{aligned} E = mc^2 &= 1{,}6605402 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} \cdot (2{,}99792458 \cdot 10^{8}\ \text{m/s})^2 \\ &= 149{,}24191 \cdot 10^{-12}\ \text{J}. \end{aligned}$$

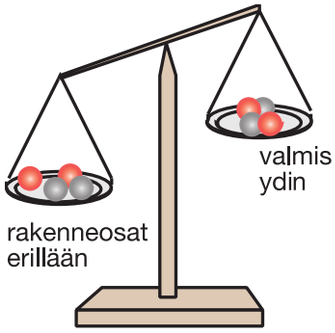
Ydin- ja hiukkasfysiikassa käytetään usein energian yksikköä 1 eV. Yhtä atomimassayksikköä vastaava energia elektronivoltteina on

$$E = \frac{149{,}24191 \cdot 10^{-12}\ \text{J}}{0{,}16021773 \cdot 10^{-18}\ \text{J/eV}} \approx 931{,}49\ \text{MeV}.$$

Atomimassayksikkö ja energia
Atomimassayksikön 1 u suuruista massaa vastaa likimain energia 931,49 MeV eli $1\ \text{u} \approx 931{,}49\ \frac{\text{MeV}}{c^2}$.

Huomaa, että massan yksikkö 1 u ja energian yksikkö 1 eV eivät ole SI-järjestelmän yksiköitä.

4.3 Sidosenergia ja massavaje



Atomin ytimen muodostavien nukleonien yhteismassa on aina suurempi kuin atomin ytimen massa.

Tarkastellaan ytimessä vallitsevan vahvan vuorovaikutuksen merkitystä vertaamalla atomin massaa sen rakenneosasten massojen summaan. Heliumatomi ${}^4_2\mathrm{He}$ koostuu kahdesta protonista, kahdesta neutronista ja kahdesta elektronista. Rakenneosasten massojen summa on

$$\begin{aligned} &2m_\mathrm{p} + 2m_\mathrm{n} + 2m_\mathrm{e} \\ &= 2 \cdot 1{,}0072765\ \mathrm{u} + 2 \cdot 1{,}0086650\ \mathrm{u} + 2 \cdot 5{,}4857990 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{u} \\ &= 4{,}0329802\ \mathrm{u}. \end{aligned}$$

Taulukkokirjan mukaan ${}^4_2\mathrm{He}$-atomin massa on 4,0026033 u.

Rakenneosasten massojen summa on erotuksen

$$4{,}0329802\ \mathrm{u} - 4{,}0026033\ \mathrm{u} = 0{,}030377\ \mathrm{u}$$

verran suurempi kuin atomin massa.

Edellä oleva tulos voidaan yleistää: ytimen muodostavien protonien ja neutronien yhteismassa on aina suurempi kuin ytimen massa. Ytimen **massavaje** Δm on ytimen rakenneosien yhteismassan ja ytimen massan erotus.

Ytimen massavaje

Ytimen massavaje Δm voidaan laskea yhtälöstä

$$\Delta m = Z \cdot m_\mathrm{p} + N \cdot m_\mathrm{n} + Z \cdot m_\mathrm{e} - m_\mathrm{atomi},$$

jossa Z on protonien lukumäärä, N neutronien lukumäärä, Z elektronien lukumäärä, m_p protonin massa, m_n neutronin massa, m_e elektronin massa ja m_atomi atomin massa, johon sisältyy elektronien massa.

Ytimen massavajetta Δm vastaavaa energiaa kutsutaan ytimen **sidosenergiaksi** E_B. Se on energia, joka vapautuu, kun nukleonit sitoutuvat toisiinsa muodostaen ytimen. Jos ydin halutaan hajottaa takaisin erillisiksi nukleoneiksi, pitää ytimeen tuoda tämä sama energiamäärä. Ytimen sidosenergia on $E_\mathrm{B} = \Delta m c^2$.

Kun lasketaan ydinreaktioissa ytimien massojen muutoksia, ytimien massojen sijasta käytetään atomien massoja, koska ytimen massaa ei voida suoraan mitata. Huomaa, että taulukkokirjassa annetaan koko atomin massa, jossa ovat siis elektronien massat mukana.

Elektronien sidosenergiat ovat elektronivolttien tai kiloelektronivolttien luokkaa, joten elektronien sidosenergian muutokset (ja niitä vastaavat massavajeiden muutokset) ovat merkityksettömän pienet verrattuna nukleonien sidosenergioihin (megaelektronivoltteja) ja niiden muutoksiin.

Sidososuus eli **sidosenergia nukleonia kohti** on atomiytimen pysyvyyden eli stabiliteetin mitta. Sidososuus on keskimääräinen energia, jolla yksi nukleoni on sitoutunut ytimeen. Sidososuus lasketaan jakamalla ytimen sidosenergia massaluvulla.

Sidosenergia ja sidososuus

Ytimen sidosenergia E_B on energia, joka tarvitaan hajottamaan ydin nukleoneiksi. Ytimen muodostuessa vapautuu sama määrä energiaa.

Sidosenergia voidaan laskea yhtälöstä

$$E_B = \Delta m c^2,$$

jossa Δm on ytimen massavaje.

Ytimen sidososuus b on ytimen sidosenergia yhtä nukleonia kohden. Sidososuus saadaan yhtälöstä $b = \frac{E_B}{A}$.

Rauta- ja nikkeliytimien sidososuudet ovat suurimmat. Nikkelin käyttöä koruissa on rajoitettu sen allergisoivan ominaisuuden takia.

Esimerkki 1

Vedyn isotooppia, jonka massaluku on kaksi, kutsutaan raskaaksi vedyksi eli deuteriumiksi (D).

Laske massavaje, sidosenergia ja sidososuus $^{60}_{28}$Ni-ytimelle. Ilmoita vastaus kahdeksan merkitsevän numeron tarkkuudella.

$Z = 28, \quad N = A - Z = 60 - 28 = 32, \quad m_{Ni} = 59{,}930788\ \text{u}$

Massavaje saadaan, kun atomin kaikkien rakenneosien massasta vähennetään atomin massa. $^{60}_{28}$Ni-ytimen massavaje on

$$\begin{aligned}\Delta m &= Z \cdot m_p + N \cdot m_n + Z \cdot m_e - m_{Ni} \\ &= 28 \cdot 1{,}0072765\ \text{u} + 32 \cdot 1{,}0086650\ \text{u} \\ &\quad + 28 \cdot 5{,}4857990 \cdot 10^{-4}\ \text{u} - 59{,}930788\ \text{u} \\ &= 0{,}5655942372\ \text{u} \approx 0{,}56559424\ \text{u}.\end{aligned}$$

Käytä laskuissa taulukkokirjassa annettuja arvoja pyöristämättöminä.

Sidosenergia on

$$\begin{aligned}E_B &= \Delta m c^2 = 0{,}5655942372\ \text{u} \cdot c^2 \\ &= 0{,}5655942372 \cdot 931{,}49432\ \frac{\text{MeV}}{c^2} \cdot c^2 \\ &= 526{,}8478194\ \text{MeV} \approx 526{,}84782\ \text{MeV}.\end{aligned}$$

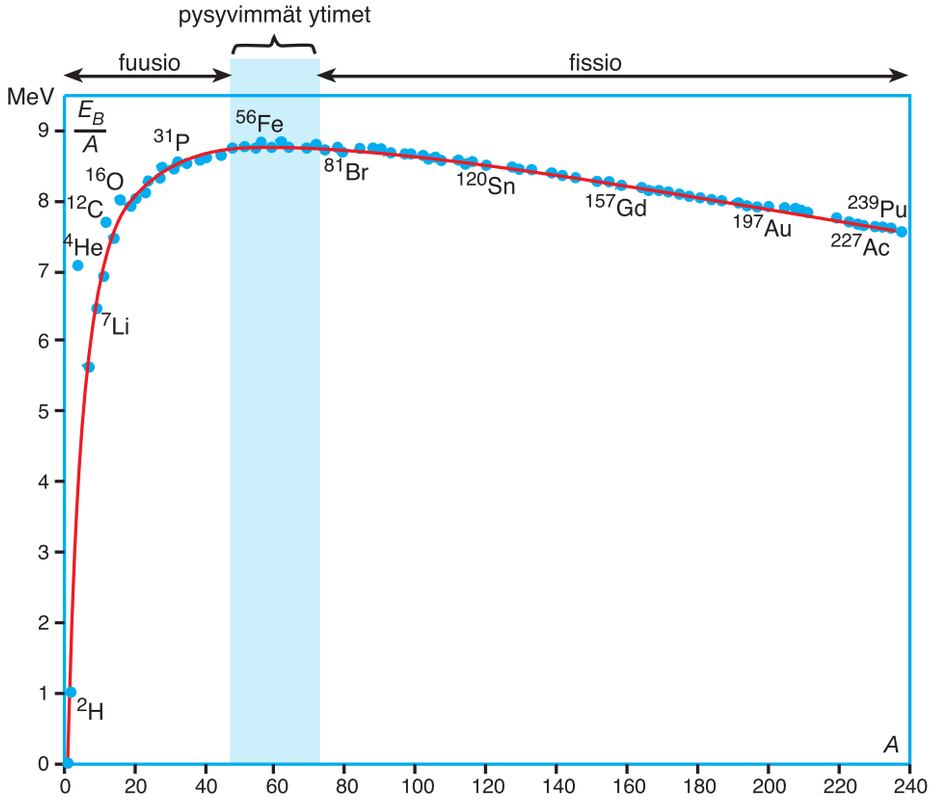
Koska Ni-ytimessä on 60 nukleonia, sidososuus on

$$b = \frac{E_B}{A} = \frac{526{,}8478194\ \text{MeV}}{60} \approx 8{,}7807970\ \text{MeV}.$$

$^{60}_{28}$Ni-ytimen massavaje on 0,56559424 u, sidosenergia 526,84782 MeV ja sidososuus 8,7807970 MeV.

Edellisen esimerkin mukaisilla laskuilla voidaan todeta, että esimerkiksi $^{2}_{1}$H-ytimen (kevyt ydin) massavaje on 0,0023883 u, sidosenergia 2,2247 MeV ja sidososuus 1,1123 MeV. Vastaavasti $^{235}_{92}$U-ytimen (raskas ydin) massavajeeksi saadaan 1,9150774 u, sidosenergiaksi 1783,8837 MeV ja sidososuudeksi 7,5609944 MeV.

Kuten nämä tulokset näyttävät osoittavankin, **keskiraskaiden ytimien sidososuus on suurin**. Siksi keskiraskaat ytimet, kuten rauta ja nikkeli, ovat pysyvimpiä ytimiä. Niissä nukleonit ovat voimakkaammin toisiinsa sitoutuneita kuin kevyemmissä ja raskaammissa ytimissä.



Keskimääräinen sidososuus on esitetty massaluvun funktiona. Sidososuus kasvaa massaluvun kasvaessa rautaan (Fe) saakka.

Ydinvoima on lyhyen kantaman voima. Ytimen nukleonit ovat vahvassa vuorovaikutuksessa vain lähimpien naapuriensa kanssa. Protonien välinen sähköinen voima on hylkimisvoima, joka on pitkän kantaman voima ja vaikuttaa ytimen kaikkien protonien välillä. Mitä enemmän ytimessä on protoneja, sitä suurempi on kuhunkin protoniin kohdistuva hylkimisvoima. Tämä selittää osaltaan sitä, että raskaiden ytimien neutroniluku on protonilukua suurempi: jokainen neutroni kohdistaa vetävän ydinvoiman lähellä oleviin muihin nukleoneihin. Massaluvun kasvaessa isojen ytimien sidososuus pienenee, joten niiden rakenne on heikompi kuin keskiraskaiden ytimien rakenne.

Tehtäviä

4-1. a) Mitä yhteistä ja mitä eroa on saman alkuaineen eri isotoopeilla?
b) Miksi saman alkuaineen isotooppeja ei voida erottaa toisistaan kemiallisin menetelmin?

4-2. a) Miksi ytimen nukleonit eivät pääse koskettamaan toisiaan?
b) Miksi protoni on sitoutunut ytimeen löyhemmin kuin neutroni?

4-3. Mitä tarkoittavat merkinnät $^{4}_{2}\mathrm{He}$, $^{226}_{86}\mathrm{Ra}$, $^{238}_{92}\mathrm{U}$ ja C-12?

4-4. a) Miksi ytimen kokoa ei voi suurentaa kuinka suureksi tahansa?
b) Ytimen massavaje voidaan laskea. Mihin massaa ”katoaa” ytimen muodostuessa?

4-5. Ydinenergiaa voidaan vapauttaa kahdella tavalla: fuusioreaktiossa ja fissioreaktiossa. Mikä on fysikaalinen peruste näissä prosesseissa energian vapautumiselle?

4-6. a) Millä aineilla on suurimmat sidososuudet?
b) Miksi keskiraskaat ytimet eivät hajoa helposti?
c) Miksi kevyet ja raskaat ytimet hajoavat helpommin kuin keskiraskaat ytimet?

4-7. Useammasta nukleonista muodostuneessa atomiytimessä kahden protonin keskimääräinen etäisyys on 2,0 fm. Kuinka suuri on protonien välinen sähköinen hylkimisvoima?

4-8. Kuparilla on useita eri isotooppeja, mutta pysyviä niistä ovat vain $^{63}\mathrm{Cu}$ ja $^{65}\mathrm{Cu}$. Näiden osuudet maankuoren kuparissa ovat 69,17 % ja 30,83 %. Laske näiden tietojen perusteella kuparin atomimassa. Vertaa tulosta taulukkokirjan arvoon.

4-9. Mitkä seuraavista vaihtoehdoista a, b, c ja d ovat oikein? Uraani $^{238}_{92}\mathrm{U}$-ytimen massa on
a) 238,050784 u
b) 238,000315 u
c) $395{,}20909 \cdot 10^{-27}$ kg
d) $0{,}22169594 \cdot 10^{12}$ eV/c^2.

4-10. Ytimen säde voidaan laskea likimäärin yhtälöstä $r = 1{,}2 \cdot \sqrt[3]{A}$ fm, jossa $A = Z + N$. Piirrä samassa mittakaavassa
a) heliumatomin ydin (kevyt)
b) rauta-atomin ydin (keskiraskas)
c) uraaniatomin ydin (raskas).

4-11. a) Rautaytimen massa on 55,9 u ja säde 5,36 fm. Laske ytimen tiheys.
b) Miksi rauta ($Z = 26$) on rakennusmateriaalina luja ja kupari ($Z = 29$) pehmeä, vaikka niiden ytimet kuuluvat keskiraskaisiin ja ovat likimain yhtä lujarakenteisia?

4-12. Laske ytimen $^{12}_{6}\mathrm{C}$ massavaje, sidosenergia ja sidososuus. Ilmoita vastaus kuuden merkitsevän numeron tarkkuudella.

4-13. a) Laske ytimen $^{208}_{82}\mathrm{Pb}$ massavaje. Ilmoita vastaus kuuden merkitsevän numeron tarkkuudella.
b) Miksi energiaa ei vapaudu, kun keskiraskas ydin hajoaa kahdeksi kevyeksi ytimeksi?
c) Miksi energiaa ei vapaudu, kun kaksi keskiraskasta ydintä liittyy yhteen hyvin raskaaksi ytimeksi?

4-14. Ytimen $^{235}_{92}\mathrm{U}$ neutroniluku ja sidososuus ovat
1) 40 ja 1,915077 MeV 2) 143 ja 1,915077 MeV
3) 143 ja 7,5910 MeV 4) 40 ja 7,5910 MeV.

Testaa, osaatko

Oikeita vastausvaihtoehtoja voi olla yksi tai useampia.

1. Nukleoni on
a) atomin ydin
b) protonien ja neutronien yhteisnimitys
c) sama kuin nuklidi.

2. Kultaisotoopin $^{197}_{79}\mathrm{Au}$ ytimessä on
a) protoneja 79
b) nuklideja 197
c) neutroneja 118.

3. Alkuaineiden ytimiä ja niiden eri isotooppeja kutsutaan
a) nukleoneiksi
b) isotoneiksi
c) nuklideiksi.

4. Ydinvoiman kantama on noin
a) 2 fm
b) 2 pm
c) 1 fm.

5. Nykyään tunnetaan
a) vajaat 120 alkuainetta
b) noin 3 000 pysyvää isotooppia
c) yli 130 000 radioaktiivista isotooppia.

6. Atomimassayksikkö on
a) yhtä suuri kuin minkä tahansa atomin atomipaino jaettuna massaluvulla
b) yhtä suuri kuin vetyatomin massa
c) $\frac{1}{12}$ hiili-isotoopin $^{12}_{6}\mathrm{C}$ atomimassasta.

7. Atomimassayksikön 1 u suuruista massaa vastaa energia
a) 931,5 MeV
b) 931,5 MeV/c^2
c) 149,2 pJ/c^2.

8. Klooriytimen $^{35}_{17}\mathrm{Cl}$ massavaje on
a) 0,23 g
b) 0,32 u
c) 0,51 u.

9. Klooriytimen $^{35}_{17}\mathrm{Cl}$ sidososuus on
a) 7,3 MeV
b) 8,5 MeV
c) 6,4 MeV.

10. Kevyiden ytimien fuusioreaktiossa sidososuus
a) pienenee
b) ei muutu
c) kasvaa.

Tiivistelmä

- Atomin ydintä kuvataan symbolilla ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$, jossa
  – X on alkuaineen kemiallinen merkki
  – Z on järjestysluku (varausluku) eli ytimessä olevien protonien lukumäärä
  – A on massaluku eli ytimessä olevien nukleonien lukumäärä.
  $A = Z + N$, jossa N on neutroniluku eli ytimessä olevien neutronien lukumäärä.

- Vahva vuorovaikutus vaikuttaa kvarkkien välillä.

- Ytimessä nukleonien välillä vallitsevaa voimaa nimitetään ydinvoimaksi. Se on vahvan vuorovaikutuksen aiheuttama voima.

- Massaan m sisältyy sisäinen energia $E = mc^2$, jossa c on valon nopeus tyhjiössä.

- Ytimen massavaje Δm voidaan laskea yhtälöstä
  $\Delta m = Z \cdot m_\mathrm{p} + N \cdot m_\mathrm{n} + Z \cdot m_\mathrm{e} - m_\mathrm{atomi}$,
  jossa Z on protonien ja elektronien lukumäärä, N neutronien lukumäärä, m_p protonin massa, m_n neutronin massa, m_e elektronin massa ja m_atomi atomin massa.

- Ytimen sidosenergia E_B on energia, joka vapautuu, kun nukleonit sitoutuvat toisiinsa muodostaen ytimen. Jos ydin halutaan hajottaa takaisin erillisiksi nukleoneiksi, pitää ytimeen tuoda tämä sama energiamäärä. Ytimen sidosenergia on $E_\mathrm{B} = \Delta m c^2$.

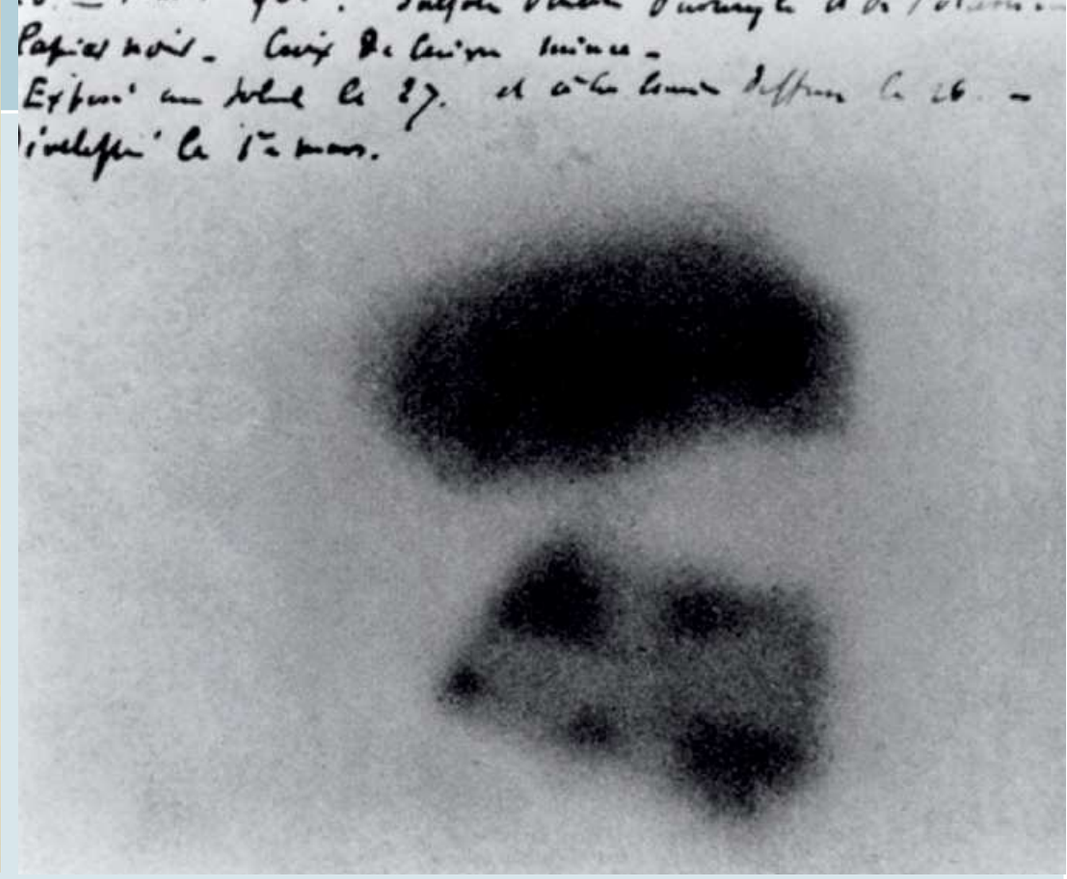
- Ytimen sidososuus b on ytimen sidosenergia yhtä nukleonia kohden. Sidososuus saadaan yhtälöstä $b = \dfrac{E_\mathrm{B}}{A}$.

5 Radioaktiivisuus ja ydinsäteily

Tässä luvussa opit
- ytimien hajoamistavat
- heikennyslain
- säteilyn ja aineen vuorovaikutustavat.

Keskeisiä käsitteitä ovat
- radioaktiivisuus
- atomimassayksikkö
- hajoamisenergia
- alfa-, beeta- ja gammasäteily
- kantama.

Marie ja Pierre Curie olivat tunnettuja tieteellisestä työskentelystään jo elinaikanaan.



Tämän kuvan avulla Henri Becquerel oivalsi, että uraani lähettää säteilyä.

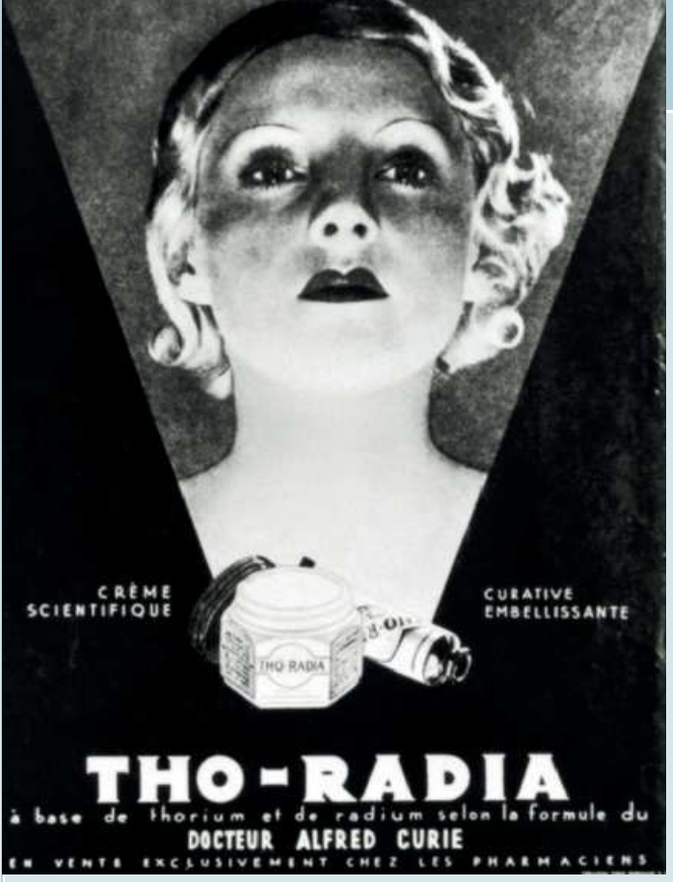
Radioaktiivisuus havaitaan

Ranskalainen fyysikko *Henri Becquerel* (1852–1908) tutki vuonna 1896 valokuvauslevyjen avulla auringonvalon uraanisuoloissa aiheuttamaa fosforenssia. Yllätyksekseen hän huomasi, että aine aiheutti valokuvauslevyjen tummumisen, vaikka aine ja levyt oli suojattu auringonvalolta. Becquerel päätteli, että valokuvauslevyjen tummuminen aiheutui uraanin lähettämästä säteilystä. Samaan aikaan löydetty röntgensäteily herätti suurta mielenkiintoa tutkijoiden parissa, joten Becquerelin havaitsema säteily jäi aluksi vaille laajempaa huomiota.

Puolalais-ranskalainen fyysikkopariskunta *Marie Curie* (1867–1934) ja *Pierre Curie* (1859–1906) löysi pikivälkkeestä kaksi uutta alkuainetta, poloniumin ja radiumin. Niiden lähettämä säteily oli samankaltaista kuin uraanin lähettämä säteily. Curiet alkoivat nimittää säteilyä radioaktiiviseksi säteilyksi. *Ernest Rutherfordin* (1871–1937) tutkimusten perusteella voitiin päätellä, että uudenlainen säteily ei ollut röntgensäteilyä, sillä se koostui kolmesta säteilytyypistä. Hän kutsui niitä alfa-, beeta- ja gammasäteilyksi. Kävi ilmi, että α- ja β-säteily koostuivat hiukkasista.

Henri Becquerel määritti beetahiukkasten massan ja varauksen suhteen. Koska tämä arvo oli sama kuin elektronille mitattu arvo, hän päätteli beetasäteilyn olevan elektroneja. Rutherford mittasi alfasäteilyn massan ja varauksen suhteen. Hän oivalsi, että alfahiukkasen sähkövaraus on kahden yksikön suuruinen ja massa neljä atomimassayksikköä: alfasäteily koostui kahden protonin ja kahden neutronin muodostamasta ryppäästä eli heliumatomin ytimistä. Radiumin lähellä huomattiinkin syntyvän heliumia.

Vuonna 1903 Rutherford ja *Frederick Soddy* (1877–1956) julkaisivat tutkimuksen, jossa he selittivät radioaktiivisuuden luonteen: radioaktiivisuuden takia aine voi muuttua toiseksi alkuaineeksi. Näkemys oli oikea, mutta sitä ei aluksi hyväksytty. Kokeelliset mittaustulokset vahvistivat kuitenkin uudet teoriat oi-



Radioaktiivisten aineiden lähettämän ionisoivan säteilyn vaarallisuudesta ei vielä 1930-luvulla tiedetty tarpeeksi. Mainoksen kasvovoide sisältää thoriumia ja radiumia. Näiden aineiden uskottiin lisäävän voiteen terveydellisiä vaikutuksia.

Moskovan lähellä sijaitseva Obninskin ydinvoimala oli toiminnassa vuodet 1954–2002

keiksi. Rutherford saikin kemian Nobelin palkinnon vuonna 1908 alkuaineiden hajoamista käsittelevistä tutkimuksistaan.

Iréne (1897–1956) ja *Frédéric* (1900–1958) *Joliot-Curien* löysivät keinotekoisen radioaktiivisuuden. Kun he säteilyttivät alumiinia ja booria alfasäteillä, syntyi luonnossa esiintymättömiä isotooppeja, jotka hajosivat lähettäen ionisoivaa säteilyä.

Italialainen fyysikko *Enrico Fermi* (1901–1954) huomasi, että uraanin pommittaminen neutroneilla tuotti radioaktiivisia aineita, joilla oli erilainen puoliintumisaika kuin ennestään tunnetuilla raskailla alkuaineilla. Hän oletti, että ydinreaktiossa syntyi uraania raskaampia alkuaineita, transuraaneja.

Uraanin halkeamisen keksivät vuonna 1938 saksalaiset kemistit *Otto Hahn* (1879–1968) ja *Fritz Strassmann* (1902–1980). Hahn kirjoitti *Lise Meitnerille* (1878–1968), että uraaninäytteeseen ilmaantuu bariumia.

Lise Meitner ja hänen sisarenpoikansa *Otto Frisch* (1904–1979) ymmärsivät bariumin ilmaantumisen johtuvan uraanin halkeamisesta kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi. He alkoivat kutsua reaktiota fissioksi. Frisch totesi laboratoriossaan, että reaktiossa vapautui paljon energiaa. Tutkimustulos julkaistiin vuonna 1939.

Fyysikot Enrico Fermi, *Niels Bohr* (1885–1962) ja *Leo Szilard* (1898–1964) kertoivat vuonna 1939 fission keksimisestä *Albert Einsteinille* (1879–1955). Tämä kirjoitti Yhdysvaltojen presidentille: ”Minulle näytettyjen tutkimusten johdosta näyttää ilmeiseltä, että uraanista voi lähitulevaisuudessa tulla uusi ja tärkeä energialähde. Sitä voitaisiin myös käyttää äärettömän voimakkaiden pommien rakentamiseen...” Kirjeen takia aloitettiin atomipommin kehitystyö. Ydinenergian rauhanomaisen käytön suunnittelu alkoi toisen maailmansodan jälkeen. Maailman ensimmäinen sähköntuotantoon rakennettu reaktori valmistui vuonna 1954.

Geoterminen energia on peräisin maapallon sisuksen radioaktiivisuudesta. Kuvassa on Islannissa sijaitseva geysir.

Graniitin luonnollinen radioaktiivisuus lämmittää maata. Nykyään kallion sisältä otetaan energiaa esimerkiksi asuntojen lämmittämiseen.

5.1 Radioaktiivisuus

Oppilastyö ▪ Säteilyn havaitseminen

1. Aseta säteilymittari (geigermittari) pöydälle. Seuraa mittarin lukemia. Mitä havaitset?

2. Kytke levykondensaattori nauhageneraattoriin tai influenssikoneeseen. Varaa kondensaattorin levyt ja aseta ne lyhyimmälle etäisyydelle niin, että kipinät eivät iske levyjen välillä. Vie alfasäteilylähde lähelle levyjen välissä olevaa rakoa. Tarkkaile raon reunaa.

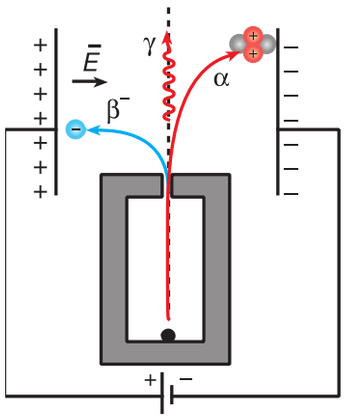
Kaikkialla luonnossa esiintyy säteilyä, joka on lähtöisin atomien ytimissä tapahtuvista muutoksista. Esimerkiksi maaperä, kasvit, ilma ja kaikki ihmisetkin säteilevät. Avaruudesta tulee Maahan tähdissä ja galakseissa syntynyttä (kosmista) säteilyä. Näitä ympäristössämme luonnostaan esiintyviä säteilyjä kutsutaan taustasäteilyksi. Taustasäteilyä ei voi havaita aistein (ks. Fysiikka 1 -kirjan s. 150). Oppilastyön kohdassa 1 mittari ilmaisee taustasäteilyn määrän.

Alkuaineiden ytimet voivat olla joko pysyviä (stabiileja) tai radioaktiivisia (epästabiileja). Radioaktiivinen ydin voi hajota itsestään (spontaanisti), jolloin ytimestä syntyy samalla säteilyä. Hajoamista nimitetään **radioaktiiviseksi hajoamiseksi** ja säteilyn eri lajeja **ydinsäteilyksi**. Ytimien säteilyä ei voida poistaa, hidastaa, nopeuttaa tai muutenkaan muuttaa.

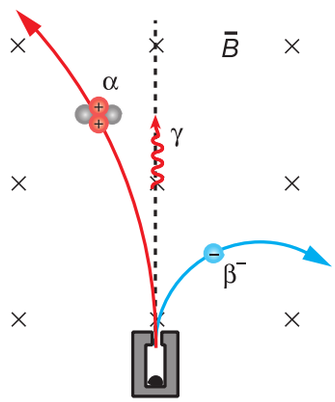
Radioaktiivisten aineiden ytimien lähettämä säteily on hiukkassäteilyä, sähkömagneettista säteilyä tai molempia. Säteily voi olla alfa-, beeta-, gamma- tai neutronisäteilyä. Näihin säteilylajeihin tutustutaan tässä luvussa.

Neutronisäteilyä syntyy luonnossa esimerkiksi raskaiden nuklidien, kuten $^{238}_{92}\mathrm{U}$:n, hajotessa kevyemmiksi nuklideiksi. Gammasäteilyä syntyy, kun ytimen viritystila purkautuu.

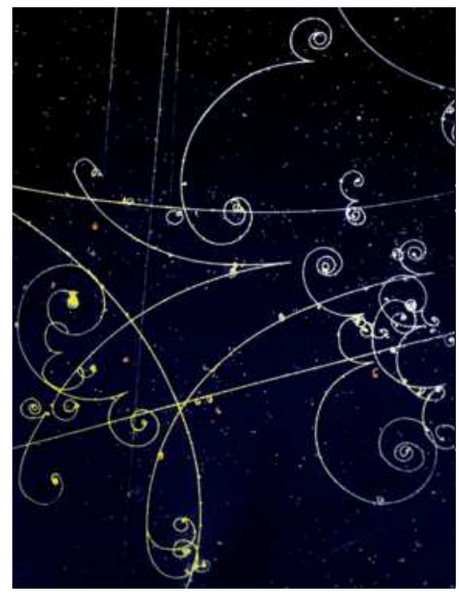
a)



b)



c)



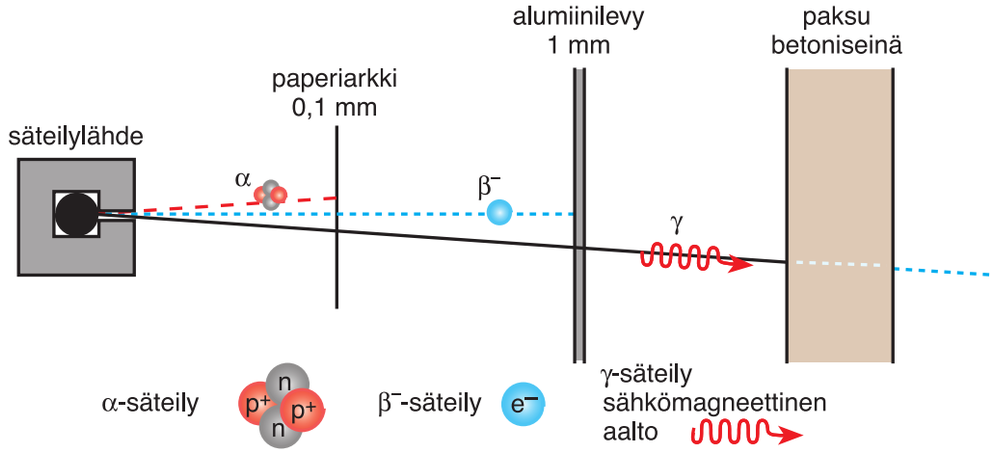
Näytteen lähettämien α- ja β-hiukkasten sekä γ-kvanttien liike homogeenisessa a) sähkökentässä ja b) magneettikentässä.
c) Positronin ja elektronin sähkövaraukset ovat erimerkkiset, ja siksi niiden radat kaareutuvat magneettikentässä vastakkaisiin suuntiin.

Ydinsäteilyn lajit
Radioaktiivisen aineen ytimet lähettävät alfa-, beeta-, gamma- tai neutronisäteilyä.

Jos säteily voi **ionisoida** kohtaamiaan atomeja tai molekyylejä eli irrottaa niistä elektroneja sähkömagneettisen vuorovaikutuksen seurauksena, säteilyä kutsutaan **ionisoivaksi säteilyksi**. Ionisoiva säteily on ihmisen terveydelle haitallista, koska se voi aiheuttaa elävissä kudoksissa kemiallisia ja biologisia muutoksia. α-, β- ja γ-säteily ovat ionisoivaa säteilyä.

Neutronisäteily ei ole suoranaisesti ionisoivaa säteilyä, koska neutroneilla ei ole sähkövarausta. Neutronisäteily on kuitenkin hyvin läpitunkevaa, ja neutronin absorboiduttua ytimeen ydin yleensä lähettää gammasäteilyä, joka on ionisoivaa säteilyä.

Radioaktiivista säteilyä ei voi havaita suoraan aistein, vaan havaitseminen voi tapahtua epäsuorasti jonkin säteilyn aiheuttaman ilmiön kautta. Säteily voi esimerkiksi virittää atomeja niin, että syntyy näkyvää valoa. Hyvin voimakkaan säteilyn absorptio voidaan havaita lämpönä. Kun oppilastyön kohdassa 2 alfalähde vietiin lähelle varatun kondensaattorin levyjen reunaa, raossa havaittiin kipinöintiä. Säteilylähteen säteily pystyy ionisoimaan ilman hiukkasia, jolloin levyjen väliin syntyy sähköpurkaus. Säteilyn havaitsemiseen käytetään erilaisia ilmaisimia.



Alfa-, beeta- ja gammasäteilyllä on kullakin erilainen läpäisykyky.

Geigerilmaisin ja pulssilaskuri.

Alfa-, beeta-, gamma- ja neutronisäteily ovat peräisin **ydinreaktioista**. Ydinreaktioissa ovat voimassa kaikki säilymislait: reaktioissa säilyvät sähkövaraus, massaluku, energia, liikemäärä ja pyörimismäärä.

Geigerputki on yleisesti käytetty säteilynilmaisin. Putken keskellä on metallikuoresta eristetty metallilanka ja täytteenä pienipaineista kaasua. Langan ja metallikuoren välillä on korkea jännite. Tuleva hiukkanen ionisoi putken täytekaasua, ja putkessa syntyy sähköpurkaus. Sähköpurkauksien määrää voidaan seurata putkeen kytketyllä laskurilla. Geigerlaskurilla voi mitata hiukkasten lukumäärää mutta ei hiukkasten energiaa.

5.2 Alfahajoaminen

Oppilastyö ▪ Alfahajoaminen

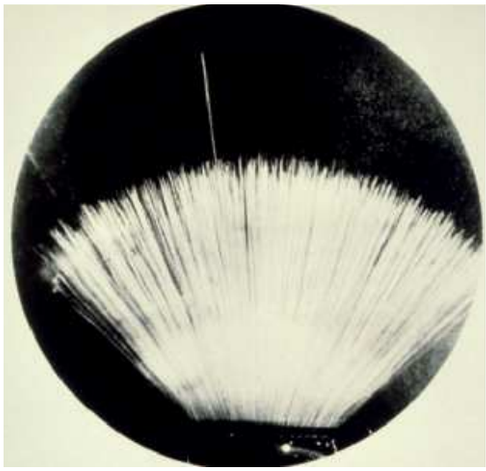
1. Mittaa luokkahuoneen taustasäteily. Aseta alfa-aktiivinen säteilylähde aivan geigerputken ikkunan lähelle ja toista mittaus. Vertaa niiden sykäyksien määriä, jotka taustasäteily ja alfalähde antavat minuutissa.

2. Tutki, kuinka kaukana α-säteilylähde korkeintaan voi olla geigerputken ilmaisimesta, jotta hiukkaset pääsevät sinne. Ilmaisimen ja säteilylähteen välissä on ilmaa.

3. Aseta paperi alfalähteen ja geigermittarin väliin. Lisää paperikerroksia ja tarkkaile säteilymittarin lukemaa.

4. Aseta voimakas kestomagneetti alfahiukkasten reitin viereen. Tarkkaile säteilymittarin lukemaa.

Protonit ja neutronit ryhmittyvät ytimessä ydinvoiman vaikutuksesta helposti kahden protonin ja kahden neutronin muodostamiksi ryppäiksi, koska tällaisten ryppäiden eli alfahiukkasten sidosenergia on suurempi kuin erillisten nukleonien yhteenlaskettu sidosenergia. Tämän takia monet raskaat ytimet emittoivat nukleoneja juuri alfahiukkasina, eivät yksittäisinä nukleoneina. Kun ydin emittoi α-hiukkasen, ytimen massaluku pienenee neljällä ja protoniluku kahdella. Emittoidulla α-hiukkasella on sama rakenne kuin heliumatomin ytimellä ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$.



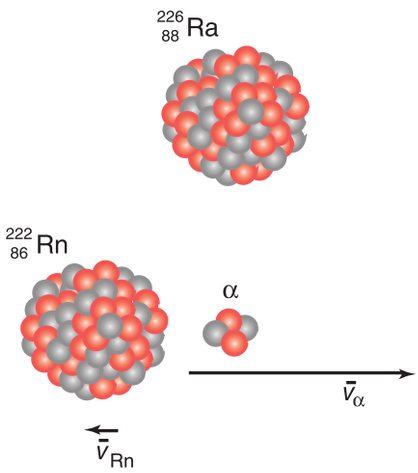
Alfahiukkasen eteneminen kupla-kammiossa. Yhden α-hiukkasen liike-energia on ollut suurempi kuin muiden.

Oppilastyössä käytetty aine amerikium-243 on α-**aktiivinen**. Kohdassa 2 havaitaan, että α-hiukkaset etenevät ilmassa vain muutamia senttimetrejä. Alfahiukkaset, joilla on sama energia, etenevät aineessa likimain yhtä pitkän matkan. Tätä matkaa kutsutaan α-säteilyn **kantamaksi** kyseisessä aineessa.

Aineessa kulkiessaan alfahiukkanen ionisoi atomeja irrottamalla niiden elektroniverhoista elektroneja. Menetettyään kaiken liike-energiansa se sitoo kaksi elektronia, jolloin siitä muodostuu heliumatomi. Siksi alfa-aktiivisen aineen lähellä muodostuu heliumkaasua.

Elektroniin verrattuna kaksinkertaisen sähkövarauksensa ja pienemmän nopeutensa (suuremman massansa) takia alfahiukkanen menettää aineessa energiansa huomattavasti lyhyemmällä matkalla kuin samanenergiainen elektroni tai positroni (beetahiukkanen). Oppilastyön kohdassa 3 α-hiukkaset pysähtyivät säteilylähteen ja ilmaisimen väliin asetettuun paperiin. Kohdassa 4 havaittiin magneettisen voiman aiheuttamasta α-hiukkasen radan kaartumisesta, että α-hiukkasen sähkövaraus on positiivinen.

α-hajoaminen
Ytimen α-hajoamisessa reaktioyhtälö on ${}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$. X on emoydin, A sen massaluku ja Z varausluku. Y on tytärydin.
α-hiukkasella on sama rakenne kuin heliumytimellä.



Viereisessä kuvassa on esitetty radiumin ${}^{226}_{88}\mathrm{Ra}$ alfahajoaminen. Alfahajoamisessa radiumin ${}^{226}_{88}\mathrm{Ra}$ (emoydin) massaluku pienenee neljällä ja protoniluku kahdella, joten tytärytimen massaluku on $A = 222$ ja protoniluku eli järjestysluku jaksollisessa järjestelmässä $Z = 86$. Alkuaineiden isotooppitaulukossa kaksi paikkaa ennen radiumia on radon. Näin ollen tytärnuklidi on radonin isotooppi. Reaktioyhtälö on ${}^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$.

Alfa-aktiivista amerikium-isotooppia $^{241}_{95}\mathrm{Am}$ käytetään palohälyttimissä. Alfahiukkaset ionisoivat säteilylähteen ja ilmaisimen välissä olevaa ilmaa, jolloin hälyttimessä kulkee pieni sähkövirta. Hälytin hälyttää, kun siihen kulkeutuva savu sitoo itseensä ioneja ja sähkövirta katkeaa.

Alfahiukkasen energian perusteella saadaan tietoa atomin ytimen rakenteesta, sillä hiukkasen liike-energia saa vain tiettyjä, **kvantittuneita** arvoja. Kun alfahiukkanen emittoituu emoytimestä, tytärydin jää kvantittuneeseen energiatilaan. Ytimissä on siis tiettyjä kvantittuneita energiatiloja. Alfahajoamisessa energia säilyy eli emo- ja tytärytimen sidosenergioiden erotusta vastaava määrä energiaa muuntuu α-hiukkasen ja tytärytimen liike-energiaksi.

Alfahajoamisessa vapautuu energiaa, koska emoytimen massa on suurempi kuin tytärytimen ja alfahiukkasen massojen summa. Vapautuva hajoamisenergia lasketaan emoatomin massan ja hajoamistuotteiden massojen avulla.

Hajoamisenergia α-hajoamisessa
Alfahajoamisessa vapautuva hajoamisenergia on

$$Q = \Delta m c^2,$$

jossa Δm on reaktion massavaje ja c valon nopeus tyhjiössä.

Esimerkki 1

Yhdessä kuutiodesimetrissä suomalaista peruskalliota on keskimäärin 10,0 mg uraania, josta 99,3 % on isotooppia $^{238}_{92}\mathrm{U}$. Kirjoita $^{238}_{92}\mathrm{U}$:n α-hajoamisreaktion
a) reaktioyhtälö
ja laske hajoamisreaktion
b) massavaje c) hajoamisenergia
d) α-hiukkasen ja tytärytimen liike-energiat.

$m_{\mathrm{He}} = 4{,}0026033$ u, $m_{\mathrm{U}} = 238{,}050784$ u, $m_{\alpha} = 4{,}001507$ u,
$m_{\mathrm{Th}} = 234{,}043593$ u, $1\ \mathrm{u} = 931{,}49432\ \mathrm{MeV}/c^2$

a) Isotoopin $^{238}_{92}\mathrm{U}$ α-hajoamisen reaktioyhtälö on

$$^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}.$$

b) Massavaje on emoytimen massan ja hajoamisessa syntyneiden tytärydinten massojen erotus. Ytimien massat lasketaan vähentämällä isotooppitaulukosta löytyvien atomien massoista elektronien massat (koska ytimien massoja ei ole taulukkokirjassa).

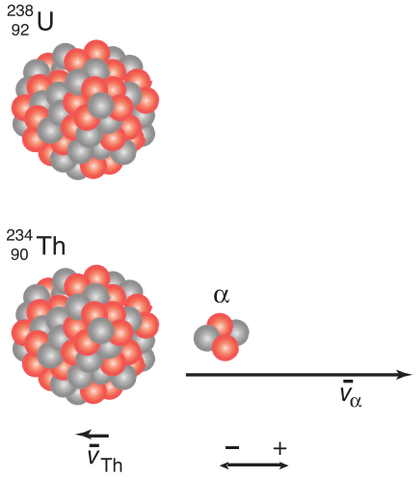
Massavaje on

$$\Delta m = [m(^{238}_{92}\mathrm{U}) - 92m_{\mathrm{e}}] - [m(^{234}_{90}\mathrm{Th}) - 90m_{\mathrm{e}} + m(^{4}_{2}\mathrm{He}) - 2m_{\mathrm{e}}].$$

Elektronien massat kumoavat toisensa, joten massavaje voidaan alfahajoamisen yhteydessä laskea atomimassojen avulla:

$$\begin{aligned}\Delta m &= m(^{238}_{92}\mathrm{U}) - m(^{234}_{90}\mathrm{Th}) - m(^{4}_{2}\mathrm{He}) \\ &= 238{,}050784\ \mathrm{u} - 234{,}043593\ \mathrm{u} - 4{,}0026033\ \mathrm{u} \\ &= 0{,}0045877\ \mathrm{u}.\end{aligned}$$

Massavaje on 0,0045877 u.



c) Hajoamisenergia Q on massavajetta $\Delta m = 0{,}0045877$ u vastaava energia:

$$\begin{aligned}Q &= \Delta m c^2 = 0{,}0045877\ \mathrm{u} \cdot c^2 \\ &= 0{,}0045877 \cdot 931{,}49432\ \frac{\mathrm{MeV}}{c^2} \cdot c^2 = 4{,}2734165\ \mathrm{MeV} \\ &\approx 4{,}2734\ \mathrm{MeV}.\end{aligned}$$

Hajoamisenergia on 4,2734 MeV.

d) Oletetaan, että ennen hajoamista uraaniydin pienestä lämpöliikkeestä huolimatta on likimain levossa ja liikemäärä on likimain nolla. Liikemäärän säilymislain perusteella liikemäärä säilyy hajoamisessa, hajoamistuotteet liikkuvat vastakkaisiin suuntiin hajoamisen jälkeen ja niiden kokonaisliikemäärä on nolla eli $\overline{p}_\alpha + \overline{p}_{Th} = \overline{0}$. Jos alfahiukkasen liikesuunta on positiivinen, saadaan skalaariyhtälö $p_\alpha - p_{Th} = 0$ eli $m_\alpha v_\alpha - m_{Th} v_{Th} = 0$.

Myös energia säilyy hajoamisessa. Oletetaan, että emoytimen hajotessa vapautuva energia muuntuu kokonaan tytärydinten liike-energiaksi: $Q = E_{k,\alpha} + E_{k,Th}$ eli $Q = \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 + \frac{1}{2} m_{Th} v_{Th}^2$. Liikemääräyhtälöstä $m_\alpha v_\alpha - m_{Th} v_{Th} = 0$ ratkaistuna toriumytimen nopeus on $v_{Th} = \frac{m_\alpha v_\alpha}{m_{Th}}$, joten hajoamisenergiaksi saadaan

$$Q = \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 + \frac{1}{2} m_{Th} \left(\frac{m_\alpha v_\alpha}{m_{Th}} \right)^2 = \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 + \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 \frac{m_\alpha}{m_{Th}}$$
$$= \underbrace{\frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2}_{E_{k,\alpha}} \left(1 + \frac{m_\alpha}{m_{Th}} \right).$$

Suomen eduskuntatalon ulkoverhoilu on suomalaista graniittia.

Yhtälöstä ratkaistaan alfahiukkasen liike-energia:

$$E_{k,\alpha} = \frac{Q}{1 + \frac{m_\alpha}{m_{Th}}} = \frac{m_{Th}}{m_{Th} + m_\alpha} Q$$
$$= \frac{234{,}043593\ \text{u}}{234{,}043593\ \text{u} + 4{,}001507\ \text{u}} \cdot 4{,}2734165\ \text{MeV}$$
$$= 4{,}2015809\ \text{MeV} \approx 4{,}2016\ \text{MeV}.$$

Toriumytimen liike-energia on hajoamisenergian ja α-hiukkasen liike-energian erotus eli

$$E_{k,Th} = Q - E_{k,\alpha} = 4{,}2734165\ \text{MeV} - 4{,}2015809\ \text{MeV}$$
$$\approx 0{,}0718\ \text{MeV}.$$

Liikemäärän ja energian säilymisestä seuraa, että alfahiukkanen saa hajoamisessa sitä suuremman osan liike-energiasta, mitä kevyempi se on verrattuna tytärytimen massaan.

Alfahiukkasen liike-energia on 4,2016 MeV ja toriumytimen 0,0718 MeV.

Pohdi ja etsi

5-1. a) Ota selvää, miten palohälytin toimii.
b) Miksi palohälyttimen oikea paikka on katossa?

5-2. a) Miksi alfahiukkasen rata aineessa on yleensä suora?
b) Miksi kaikki alfahiukkaset, joilla on yhtä suuri liike-energia, etenevät aineessa yleensä likimain yhtä kauas säteilylähteestä?
c) Miksi alfahiukkasen liikkeen suunta voi joskus muuttua ja hiukkanen voi kimmota aineessa jopa takaisin tulosuuntaansa?
d) α-aktiivinen aine lähettää myös sähkömagneettista säteilyä gammasäteilyn taajuusalueella. Millainen on α-aktiivisen aineen gammasäteilyn spektri?

5-3. Poloniumnuklidi lähettää alfahiukkasen suurella nopeudella. Pohdi, miten kultaydin vaikuttaa alfahiukkasen liikkeeseen Rutherfordin kokeessa, jos alfahiukkanen
a) lähestyy suoraan kultaytimen keskipistettä
b) ohittaa läheltä kultaytimen.

5-4. a) Mistä alfa-aktiivisen aineen emittoima alfahiukkanen saa liike-energiansa?
b) Miksi α-hiukkanen menettää liike-energiansa?
c) Miksi alfa-aktiivisen aineen lähettyvillä muodostuu heliumkaasua?

5-5. Selvitä $^{234}_{92}\mathrm{U}$-ytimen α-hajoamisketju poloniumiin asti.

Tehtäviä

5-6. Täydennä α-hajoamisten ydinreaktioyhtälöt.

a) $^{222}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow _____ + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

b) $_____ \rightarrow {}^{217}_{85}\mathrm{At} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

c) $^{233}_{92}\mathrm{U} \rightarrow _____ + _____$

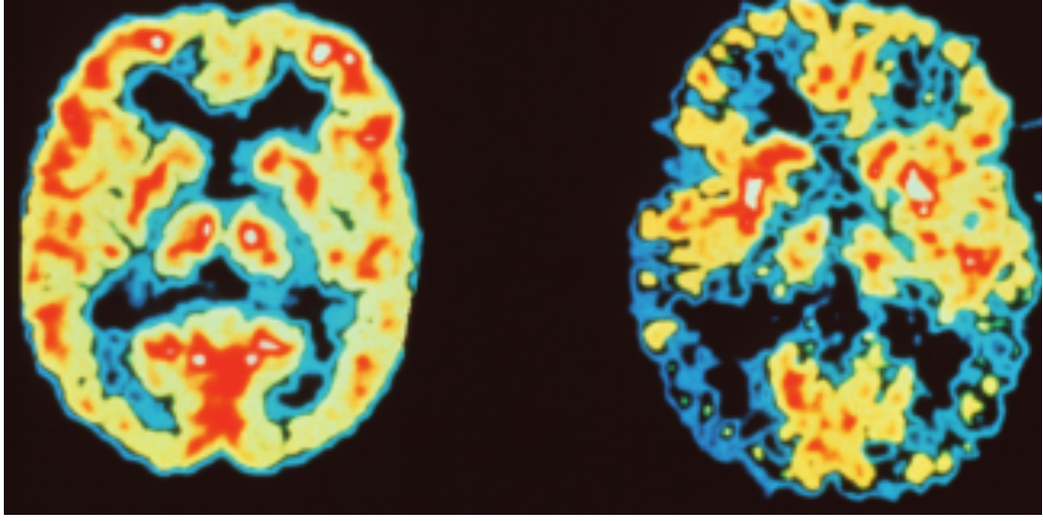
5-7. Kirjoita alfa-aktiivisen
a) poloniumisotoopin $^{214}_{84}\mathrm{Po}$
b) protaktiniumisotoopin $^{231}_{91}\mathrm{Pa}$
c) plutoniumisotoopin $^{240}_{94}\mathrm{Pu}$
hajoamisyhtälö.

5-8. Alfahiukkasen liike-energia on 5,4 MeV, kun hiukkanen lähtee nuklidista.
a) Mikä on hiukkasen nopeus?
b) Kuinka monta atomia α-hiukkanen pystyy ionisoimaan, jos yhteen ionisaatioon kuluu 35 eV energiaa?
c) Miten alfahiukkasen energia liittyy alfasäteilyn vaarallisuuteen?

5-9. Aktiniumisotooppi $^{225}_{89}\mathrm{Ac}$ on alfa-aktiivinen.
a) Kirjoita hajoamisyhtälö.
b) Laske reaktion
1) massavaje 2) hajoamisenergia.

5-10. Lääketieteessä ja tekniikassa käytettiin aikanaan yleisesti α-aktiivista radiumisotooppia $^{226}\mathrm{Ra}$.
a) Kirjoita $^{226}\mathrm{Ra}$:n hajoamisreaktio ja päättele, mikä säteilyturvallisuusongelma liittyi suurten radiummäärien säilyttämiseen laboratoriossa, vaikka säilytys tapahtui riittävän paksuseinäisissä lyijyastioissa.
b) Laske radiumytimen hajoamisessa vapautuvan α-hiukkasen nopeus edellyttäen, että reaktiossa ei synny gammasäteilyä.

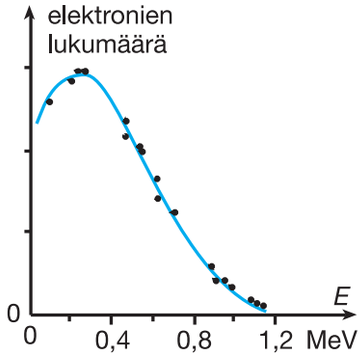
Beetasäteilyä hyödynnetään positroniemissiotomografiassa (PET).



Vasemmalla on PET-kuva terveistä aivoista, oikealla Altzheimer-potilaan aivoista.

5.3 Beetahajoaminen

Kun ytimet emittoivat elektroneja (e^-) tai positroneja (e^+), on kyse **beetasäteilystä** ja **ytimien sanotaan olevan β-aktiivisia**. Positroni on elektronin antihiukkanen. Sen massa on yhtä suuri kuin elektronin massa, ja sen sähkövaraus on $+e$.



β^--säteilyn energiaspektri. *E* on elektronin liike-energia.

1900-luvun alussa todettiin radioaktiivisen aineen beetasäteilyn energiaspektrin olevan jatkuva. Tieto herätti hämmennystä, koska se näytti olevan ristiriidassa muissa atomimaailman ilmiöissä havaitun energian kvantittumisen kanssa. Alfasäteilyn energiajakauma on kvantittunut, joten ytimen tiedettiin olevan rakenteeltaan kvantittunut. Ajateltiin, että myös ytimestä tulevien muidenkin hiukkasten energian olisi pitänyt olla kvantittunut.

Mittausten mukaan β-hiukkasen liike-energia voi olla nollan ja tietyn maksimiarvon välillä. Maksimienergia vastaa emoytimen ja tytärytimen massaeroa. Jos hajoamisessa ei synny tytärytimen ja elektronin tai positronin lisäksi muita hiukkasia, kaikilla β-hiukkasilla tulisi olla maksimienergia energian säilymislain perusteella. Beetahajoamisessa ei kuitenkaan löydetty muita hiukkasia, joten spektrin jatkuvuus oli mysteeri.

Wolfgang Pauli (1900–1958) esitti vuonna 1930 ilmiön selittämiseksi oletuksen, että β-hiukkasen (elektroni tai positroni) lisäksi atomin ytimestä emittoituu toinenkin hiukkanen, neutriino ν tai antineutriino $\bar{\nu}$, joka vuorovaikuttaa aineen kanssa heikosti ja on siksi vaikeasti havaittava.

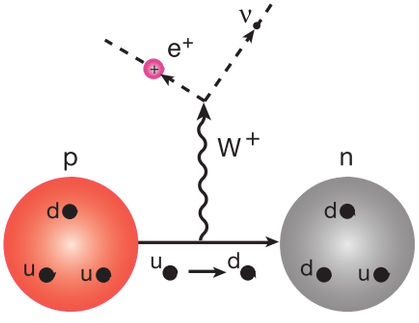
Paulin mukaan β-hajoamisessa vapautuva hajoamisenergia jakautuu kolmen hiukkasen kesken, jolloin β-hiukkasen energia voi mittaustulosten mukaisesti olla kuinka suuri tahansa nollan ja maksimiarvon välillä. Paulin mukaan neutriino on varaukseton ja massaton, sen nopeus on aina valon nopeus ja sen vuorovaikutus aineen kanssa erittäin heikko. Neutriinon olemassaolo onnistuttiin todentamaan kokeellisesti vasta vuonna 1956. Neutriinon löytäminen vahvisti käsitystä energian säilymisestä sekä massan ja energian ekvivalenssista.

Oppilastyö ▪ Beetahajoaminen

Mittaa luokan taustasäteilystä johtuvien sykäysten määrä minuutissa. Aseta β^--aktiivinen isotooppinäyte geigerputken lähelle ja mittaa sykäysten määrä minuutin aikana.

1. Pane alumiinifolio säteilylähteen ja geigerputken väliin. Tarkkaile säteilyn läpäisyä. Taita alumiinifolio kaksinkertaiseksi ja tarkkaile säteilyn läpäisykykyä. Käytä useita foliokerroksia.

2. Aseta voimakas kestomagneetti β-säteilyn reitin viereen. Vaikuttaako magneettikenttä elektronien liikkeeseen?



Symbolinen esitys protonin hajoamisesta neutroniksi, positroniksi ja neutriinoksi atomin ytimessä.

Oppilastyön kohdassa 1 havaitaan, että alumiinifolio vähentää geigerputkeen pääsevien elektronien määrää ja että jo muutama kerros alumiinia pysäyttää lähes kaikki elektronit. Beetasäteily pysähtyy pari millimetriä paksuun alumiiniin. Kohdassa 2 voidaan päätellä magneettisen voiman aiheuttamasta β-hiukkasen radan kaartumisesta, että β-hiukkasen sähkövaraus on negatiivinen.

Beetahajoaminen tapahtuu **heikon vuorovaikutuksen** seurauksena. Heikon vuorovaikutuksen välittäjähiukkasia ovat **välibosoneiksi** kutsutut W^+, W^- ja Z^0. Heikon vuorovaikutuksen kantama on vain 10^{-18} m. Protonien ja neutronien sisällä olevat kvarkit ovat tarpeeksi lähellä toisiaan ja voivat tuntea heikon vuorovaikutuksen. Esimerkiksi β^+-hajoamisessa atomin ytimessä

protonin kvarkkirakenne uud (u = ”up” ja d = ”down”) muuttuu rakenteeksi udd. Samalla emittoituu välibosoni W^+, joka muuttuu positroniksi (e^+) ja neutriinoksi (ν).

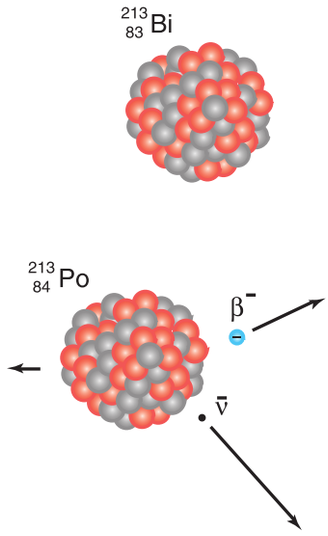
Neutroni hajoaa heikossa vuorovaikutuksessa vapaana (puoliintumisaika on noin 15 minuuttia) ja voi hajota myös atomin ytimessä β^--hajoamisessa. Heikon vuorovaikutuksen välittäjähiukkaset löydettiin kokeellisesti vuonna 1983.

Beetahajoamisessa energia jakautuu hajoamistuotteiden eli tytärytimen, β-hiukkasen ja neutriinon tai antineutriinon kesken. Ytimestä emittoituvan β-hiukkasen maksimienergia on yleensä suuruusluokkaa 1 MeV. Beetasäteilyn käyttömahdollisuudet ja myös vaarallisuus johtuvat sen ionisoimiskyvystä, joka puolestaan johtuu β-hiukkasen sähkövarauksesta ja energian suuruudesta. Beetasäteilyn yhteydessä esiintyy myös gammasäteilyä, koska β-hajoamisen jälkeen tytärydin voi jäädä viritystilaan ja sen purkautuessa syntyy γ-säteilyä.

β^--hajoaminen

Kun **ydin emittoi elektronin**, kyseessä on **β^--hajoaminen**. Koska atomin ytimessä on vain protoneja ja neutroneja, niiden täytyy muuttua beetahajoamisen yhteydessä. β^--aktiivisissa ytimissä neutroni muuttuu protoniksi ja samalla elektroni ja antineutriino emittoituvat. Muissa ytimissä neutroni on pysyvä. Vapaa, ytimen ulkopuolella oleva neutroni hajoaa spontaanisti protoniksi, elektroniksi ja antineutriinoksi samaan tapaan kuin β^--aktiivisissa ytimissä. β^--hajoamisessa alkuaineen atomin ydin X muuttuu toisen alkuaineen ytimeksi Y. Ytimen massaluku säilyy, mutta varausluku (protoniluku) kasvaa yhdellä.

β^--hajoaminen:
$^{213}_{83}\text{Bi} \rightarrow {}^{213}_{84}\text{Po} + {}^{0}_{-1}\text{e} + \overline{\nu}$.



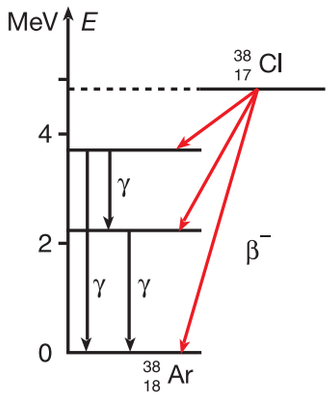
β^--hajoaminen

β^--aktiivisessa ytimessä neutroni muuttuu protoniksi ja samalla ytimestä emittoituu elektroni ja antineutriino. Hajoamisreaktio on

$$ {}^{A}_{Z}\text{X} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}\text{Y} + {}^{0}_{-1}\text{e} + \overline{\nu}, $$

jossa X on emoydin, Y tytärydin, ${}^{0}_{-1}\text{e}$ elektroni ja $\overline{\nu}$ antineutriino.

Neutronin hajoamisen reaktioyhtälö on ${}^{1}_{0}\text{n} \rightarrow {}^{1}_{1}\text{p} + {}^{0}_{-1}\text{e} + \overline{\nu}$.



$^{38}_{17}$Cl-isotoopin β^--hajoaminen.

Atomin ytimestä suurella nopeudella sinkoutuva elektroni on negatiivisen sähkövarauksensa takia vuorovaikutuksessa varauksisten hiukkasten kanssa. Vuorovaikutuksessa aineen kanssa elektroni menettää energiansa pääasiassa atomien ionisoimiseen ja virittämiseen sekä jarrutussäteilyyn. Törmäysten takia beetahiukkasen rata aineessa mutkittelee, minkä vuoksi beetasäteilyn kantama ei ole yhtä tarkasti määriteltävissä kuin suoraan etenevän alfasäteilyn kantama. Ilmassa 1 MeV:n elektronin kantama on keskimäärin 2,7 m, mutta osa elektroneista etenee tätä merkittävästi pidemmän tai lyhyemmän matkan. Kiinteässä aineessa kantama on vain millimetrien luokkaa.

Esimerkki 2

Talliumisotooppi Tl-208 on β^--aktiivinen.
a) Kirjoita hajoamisen reaktioyhtälö.
b) Laske reaktiossa syntyvä massavaje.

$m_{\mathrm{Tl}} = 207{,}981988\ \mathrm{u}, \quad m_{\mathrm{Pb}} = 207{,}976627\ \mathrm{u}$

a) β^--hajoamisessa talliumydin lähettää elektronin ja antineutriinon, jolloin syntyy lyijy-ydin. Tytärytimen protoniluku on yhtä suurempi kuin emoytimen. Massaluku pysyy samana. Reaktioyhtälö on

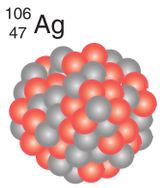
$$^{208}_{81}\mathrm{Tl} \rightarrow {}^{208}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}.$$

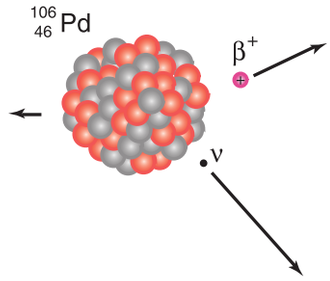
Neutriinon ja antineutriinon massasta ei ole olemassa varmaa tietoa, mutta se on korkeintaan sadastuhannesosia elektronin massasta.

b) Reaktioyhtälössä esiintyvän antineutriinon massa oletetaan nollaksi, joten sitä ei oteta huomioon. Ytimien massat lasketaan vähentämällä atomien massoista elektronien massat. Massavaje on

$$\begin{aligned}\Delta m &= [m(^{208}_{81}\mathrm{Tl}) - 81m(\mathrm{e})] - [m(^{208}_{82}\mathrm{Pb}) - 82m(\mathrm{e}) + m(\mathrm{e})] \\ &= m(^{208}_{81}\mathrm{Tl}) - m(^{208}_{82}\mathrm{Pb}) = 207{,}981988\ \mathrm{u} - 207{,}976627\ \mathrm{u} \\ &= 0{,}005361\ \mathrm{u}.\end{aligned}$$

Massavaje on 0,005361 u.





β+-hajoaminen:
$^{106}_{47}\text{Ag} \rightarrow {}^{106}_{46}\text{Pd} + {}^{0}_{+1}\text{e} + \nu$.

β+-hajoaminen

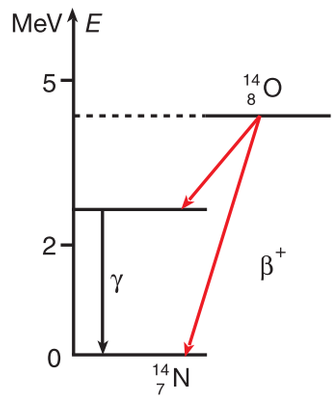
Kun atomin ydin emittoi positronin, kyseessä on β+-hajoaminen. β+-hajoamisessa protoni muuttuu ytimessä neutroniksi ja samalla positroni ja neutriino emittoituvat.

β+-hajoaminen
β+-hajoamisessa protoni muuttuu ytimessä neutroniksi ja samalla ytimestä emittoituu positroni ja neutriino.
Hajoamisreaktio on

$$^{A}_{Z}\text{X} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\text{Y} + {}^{0}_{+1}\text{e} + \nu,$$

jossa X on emoydin, Y tytärydin, $_{+}{}^{0}_{1}\text{e}$ positroni ja ν neutriino.

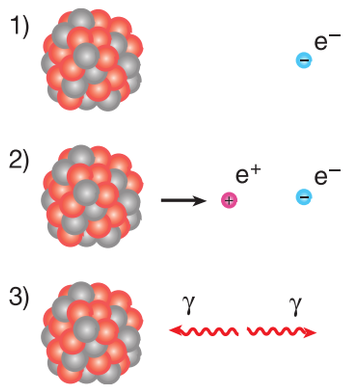
Protonin hajoamisen reaktioyhtälö on $^{1}_{1}\text{p} \rightarrow {}^{1}_{0}\text{n} + {}^{0}_{+1}\text{e} + \nu$.



$^{14}_{8}$O-isotoopin β+-hajoaminen.

Vapaa protoni ei energian säilymislain takia voi muuttua edellisen yhtälön mukaisesti (neutronin massa on suurempi kuin protonin massa), mutta ytimeen sitoutunut protoni voi. β+-hajoamisessa ytimen massaluku säilyy mutta varausluku pienenee yhdellä.

β+-hajoamisessa syntyvä positroni on elektronin antihiukkanen. Kun positroni kohtaa aineessa elektronin, ne yhdistyvät eli annihiloituvat. Koska aineessa on elektroneja runsaasti, jokainen beetasäteilyssä syntynyt positroni annihiloituu pian syntymänsä jälkeen. **Annihilaatio** vapaan elektronin kanssa on paljon todennäköisempää kuin annihilaatio sidotun elektronin kanssa. Annihilaatiossa syntyy kaksi gammakvanttia. Reaktioyhtälö on $^{0}_{+1}\text{e} + {}^{0}_{-1}\text{e} \rightarrow 2\gamma$.



Annihilaatio.

Positroniemissiotomografiassa (PET) potilaaseen ruiskutetaan β+-aktiivista merkkiainetta, joka kulkeutuu tutkittavaan elimistön kohtaan. Merkkiaineen säteilemän positronin annihiloituessa elimistössä olevan elektronin kanssa syntyy gammasäteilyä, jonka avulla saadaan poikkileikkauskuvia potilaan elimistöstä. Positroniemissiotomografian avulla voidaan etsiä kasvaimia, tutkia verenkiertoa ja seurata aivotoimintoja esimerkiksi puhuttaessa, kuunneltaessa tai unen eri vaiheissa. (Ks. kuvat s. 109.)

Esimerkki 3

Kalsiumisotooppi $^{39}_{20}\mathrm{Ca}$ on β^+-aktiivinen. Laske sen hajoamisenergia.

$m_{\mathrm{Ca}} = 38{,}970718\ \mathrm{u}, \quad m_{\mathrm{K}} = 38{,}963707\ \mathrm{u},$
$m_{\mathrm{e}} = 5{,}4857990 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{u}, \quad 1\ \mathrm{u} = 931{,}49432\ \mathrm{MeV/c^2}$

β^+-hajoamisessa kalsiumydin lähettää positronin ja neutriinon ja muuttuu kaliumytimeksi. Tytärytimen protoniluku on yhtä pienempi kuin emoytimen. Massaluku pysyy samana. Reaktioyhtälö on

$$^{39}_{20}\mathrm{Ca} \rightarrow {}^{39}_{19}\mathrm{K} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \nu.$$

Neutriinon massa oletetaan nollaksi. Ytimien massat lasketaan vähentämällä atomien massoista elektronien massat. Positronin massa on yhtä suuri kuin elektronin massa, eli $m(\mathrm{e}^+) = m(\mathrm{e}^-) = m(\mathrm{e})$. Massavaje on

β^+-hajoamisen laskuissa on huomioitava myös positronin ja elektronien massat.

$$\begin{aligned}\Delta m &= [m(^{39}_{20}\mathrm{Ca}) - 20m(\mathrm{e})] - [m(^{39}_{19}\mathrm{K}) - 19m(\mathrm{e}) + m(\mathrm{e})] \\ &= m(^{39}_{20}\mathrm{Ca}) - m(^{39}_{19}\mathrm{K}) - 2m(\mathrm{e}) \\ &= 38{,}970718\ \mathrm{u} - 38{,}963707\ \mathrm{u} - 2 \cdot 5{,}4857990 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{u} \\ &\approx 0{,}00591384\ \mathrm{u}.\end{aligned}$$

Massavajetta vastaava hajoamisenergia on

$$\begin{aligned}Q &= \Delta m c^2 = 0{,}00591384\ \mathrm{u} \cdot c^2 \\ &= 0{,}00591384 \cdot 931{,}49432\ \frac{\mathrm{MeV}}{c^2} \cdot c^2 \approx 5{,}509\ \mathrm{MeV}.\end{aligned}$$

Hajoamisenergia on 5,509 MeV.

5.4 Elektronisieppaus

Jos atomin järjestysluku on suuri, ydin voi siepata elektronin atomin sisimmältä kuorelta. Ytimeen joutunut elektroni reagoi protonin kanssa, jolloin protoni muuttuu neutroniksi ja ydin säteilee neutriinon. Reaktioyhtälö on ${}_1^1\mathrm{p} + {}_{-1}^{0}\mathrm{e} \longrightarrow {}_0^1\mathrm{n} + \nu$. Tätä tapahtumaa kutsutaan **elektronisieppaukseksi** (EC, *electron capture*). Elektronisieppauksessa ydin ${}_Z^A\mathrm{X}$ muuttuu ${}_{Z-1}^{A}\mathrm{Y}$-ytimeksi.

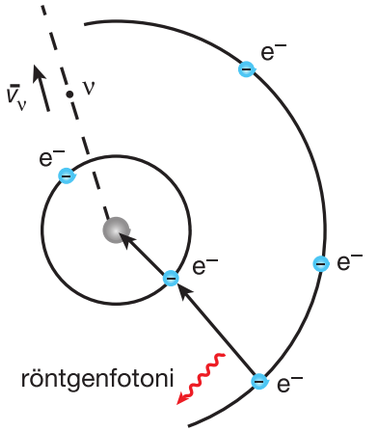
Koska raskailla ytimillä on kevyitä ytimiä suurempi positiivinen sähkövaraus (Z suuri), niiden sisimmät elektronit ovat lähempänä ydintä kuin kevyiden atomien elektronit. Tämän takia elektronisieppaus tapahtuu raskaissa atomeissa todennäköisemmin kuin kevyissä.

Elektronisieppaus
Elektronisieppauksessa ytimeen siepattu elektroni reagoi protonin kanssa ja syntyy neutroni ja neutriino.
Elektronisieppauksessa reaktioyhtälö on

$${}_Z^A\mathrm{X} + {}_{-1}^{0}\mathrm{e} \longrightarrow {}_{Z-1}^{A}\mathrm{Y} + \nu,$$

jossa X on emoydin, Y tytärydin, ${}_{-1}^{0}\mathrm{e}$ elektroni ja ν neutriino.

Protonin hajoamisreaktio elektronisieppauksessa on ${}_1^1\mathrm{p} + {}_{-1}^{0}\mathrm{e} \longrightarrow {}_0^1\mathrm{n} + \nu$. Esimerkiksi elohopea ${}_{80}^{194}\mathrm{Hg}$ muuttuu elektronisieppauksessa kullaksi ${}_{79}^{194}\mathrm{Au}$ yhtälön
${}_{80}^{194}\mathrm{Hg} + {}_{-1}^{0}\mathrm{e} \longrightarrow {}_{79}^{194}\mathrm{Au} + \nu$ mukaan.



Kun ydin sieppaa elektronin atomin sisimmältä kuorelta, elektroniverhoon jää elektroniaukko. Tämä aukko täyttyy ylemmältä energiatasolta tulevalla elektronilla. Elektronin siirtymä miltä tahansa ylemmältä tilalta tilalle $n = 1$ synnyttää röntgensäteilyn kvantin. Näin ollen elektronisieppauksen yhteydessä havaitaan kyseisen isotoopin röntgenspektrin ominaissäteilyä.

Elektroni siepataan lähes aina sisimmältä K-kuorelta. Todennäköisyys elektronisieppaukseen L-kuorelta on hyvin pieni. Emittoitunut röntgenfotoni paljastaa elektroniverhossa tapahtuneen muutoksen – siis myös sen, onko kyseessä K- vai L-sieppaus.

Esimerkki 4

Koboltti-isotooppi $^{57}_{27}\mathrm{Co}$ muuttuu elektronisieppauksessa raudaksi.
a) Kirjoita reaktioyhtälö.
b) Laske elektronisieppauksessa vapautuva energia.

$m_{\mathrm{Co}} = 56{,}936294\ \mathrm{u}, \quad m_{\mathrm{Fe}} = 56{,}935396\ \mathrm{u},$
$1\ \mathrm{u} = 931{,}49432\ \mathrm{MeV}/c^2$

a) Kobolttiydin sieppaa elektroniverhosta yhden elektronin, jolloin ytimessä protoni muuttuu neutroniksi. Ytimen protoniluku pienenee yhdellä ja neutroniluku kasvaa yhdellä. Massaluku ei muutu. Reaktiossa vapautuu neutriino. Koboltti muuttuu raudaksi seuraavan reaktioyhtälön mukaisesti:

$$^{57}_{27}\mathrm{Co} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{57}_{26}\mathrm{Fe} + \nu.$$

b) Lasketaan massavaje vähentämällä kobolttiytimen ja sen sieppaaman elektronin yhteenlasketusta massasta rautaytimen massa. Neutriinon massa oletetaan nollaksi.

Atomien ydinten massat lasketaan vähentämällä atomimassoista elektronien massat:

$$\begin{aligned}\Delta m &= [m(^{57}_{27}\mathrm{Co}) - 27m(\mathrm{e}) + m(\mathrm{e})] - [m(^{57}_{26}\mathrm{Fe}) - 26m(\mathrm{e})] \\ &= m(^{57}_{27}\mathrm{Co}) - m(^{57}_{26}\mathrm{Fe}) = 56{,}936294\ \mathrm{u} - 56{,}935396\ \mathrm{u} \\ &= 0{,}000898\ \mathrm{u}.\end{aligned}$$

Massavajetta vastaava vapautuva energia on

$$\begin{aligned}Q &= \Delta m c^2 = 0{,}000898\ \mathrm{u} \cdot c^2 \\ &= 0{,}000898 \cdot 931{,}49432\ \frac{\mathrm{MeV}}{c^2} \cdot c^2 \approx 0{,}836\ \mathrm{MeV}.\end{aligned}$$

Vapautuva energia on 0,836 MeV.

Tehtäviä

5-11. a) Atomin elektroniverhosta voidaan irrottaa elektroni. Miten on mahdollista, että ytimestäkin voi lähteä elektroni?
b) Vapaa neutroni voi hajota spontaanisti protoniksi, elektroniksi ja antineutriinoksi. Voiko vapaa protoni hajota spontaanisti neutroniksi, positroniksi ja neutriinoksi?

5-12. Auringossa tapahtuvista ydinreaktioista saapuu maanpinnalle neutriinoja noin 10^{15} kpl/s neliömetrin pinta-alaa kohti. Miksi tältä hiukkassäteilyltä ei ole tarpeen suojautua?

5-13. Miksi elektronisieppauksen tapahduttua havaitaan ominaissäteilyä (karakteristista röntgensäteilyä) mutta ei jarrutussäteilyä?

5-14. a) Millä tavalla säteilysuoja tulisi rakentaa, että se pysäyttäisi beetasäteilyn?
b) Jos beeta-aktiivinen aine nostetaan vedestä ilmaan, beetahiukkasen kantama tuhatkertaistuu. Miten käsitellään turvallisesti voimakkaasti säteilevää beeta-aktiivista ainetta?

5-15. Täydennä ydinreaktioyhtälöt puuttuvilta osin.

a) ${}^{23}_{10}\mathrm{Ne} \rightarrow _____ + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$

b) ${}^{229}_{91}\mathrm{Pa} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow _____ + \nu$

c) $_____ \rightarrow {}^{18}_{8}\mathrm{O} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \nu$

d) $_____ \rightarrow {}^{225}_{89}\mathrm{Ac} + _____ + \overline{\nu}$

5-16. Nuklidit ${}^{66}\mathrm{Ni}$ ja ${}^{108}\mathrm{Ag}$ ovat β^--aktiivisia ja nuklidit ${}^{8}\mathrm{B}$ ja ${}^{52}\mathrm{Fe}$ β^+-aktiivisia. Kirjoita näiden nuklidien beetahajoamisen reaktioyhtälöt.

5-17. Mitkä seuraavista hajoamisreaktioista voivat kuvata spontaaneja hajoamisia ja mitkä eivät? Perustele vastauksesi.

a) ${}^{131}_{53}\mathrm{I} \rightarrow {}^{131}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$

b) ${}^{106}_{47}\mathrm{Ag} \rightarrow {}^{131}_{48}\mathrm{Cd} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$

c) ${}^{211}_{83}\mathrm{Bi} \rightarrow {}^{211}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \nu$

d) ${}^{40}_{19}\mathrm{K} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{40}_{18}\mathrm{Ar} + \nu$

e) ${}^{112}_{50}\mathrm{Sn} \rightarrow {}^{120}_{51}\mathrm{Sb} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$

f) ${}^{23}_{12}\mathrm{Mg} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{23}_{13}\mathrm{Al} + \overline{\nu}$

5-18. Kirjoita hiili-isotoopin hajoamisyhtälö ja laske massavaje:
a) β^--aktiivinen ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$ b) β^+-aktiivinen ${}^{11}_{6}\mathrm{C}$.
c) Laske vapautuva energia cesium-isotoopin ${}^{132}_{55}\mathrm{Cs}$ elektronisieppauksessa.

5-19. a) Laske ${}^{14}\mathrm{C}$-ytimen emittoiman elektronin suurin liike-energia.
b) Miksi elektronin liike-energia voi saada muitakin arvoja?

5-20. Lyhytikäisen ${}^{12}\mathrm{N}$-isotoopin β^+-hajoamisen tulosydin ${}^{12}\mathrm{C}$ jää hajoamisen jälkeen viritystilaan. Ydin siirtyy perustilaan emittoimalla gammafotonin, jonka energia on 15,102 MeV. Laske ${}^{12}\mathrm{C}$-ytimen gammaemissiossa saama liike-energia (rekyylienergia). Oletetaan, että ydin ei liiku fotonin emittoitumissuunnassa ennen emissioita. Kuinka suuri on ${}^{12}\mathrm{C}$-ytimen viritystilan energia? [K2007, 9]

5-21. Radioaktiivisen aineen ytimet voivat hajota mm. α-, β^-- ja β^+-hajoamisessa sekä elektronisieppauksessa EC (merkitty nuklidikartassa tunnuksella ε). Kirjoita
a) ${}^{209}\mathrm{Pb}$- ja ${}^{210}\mathrm{Bi}$-ytimien hajoamisreaktiot
b) ${}^{211}\mathrm{At}$-ytimen hajoamisketjun kaikki mahdolliset hajoamisreaktiot stabiiliin ytimeen asti. Käytä apuna taulukkokirjan isotooppitaulukkoa ja s. 189 olevaa nuklidikarttaa.

5.5 Gammasäteily

Kun ydin siirtyy viritystilasta alempaan viritystilaan tai perustilaan, se emittoi lyhytaaltoista sähkömagneettista säteilyä, gammasäteilyä. Usein gammasäteilyä syntyy α- ja β-hajoamisen yhteydessä. Gammasäteilyä emittoiva nuklidi pysyy samana nuklidina, eli alkuaine ei muutu toiseksi alkuaineeksi. Koska ytimestä lähtevän gammasäteilyn aallonpituus riippuu ytimestä, gammasäteilyn perusteella voi tunnistaa radioaktiivisia aineita.

Gammasäteily
Kun ydin siirtyy viritystilasta alempaan viritystilaan tai perustilaan, ytimestä emittoituu gammasäteilyä.

Oppilastyö ▪ Puoliintumispaksuus

1. Mittaa luokkahuoneen taustasäteily.

2. Aseta gamma-aktiivinen, esimerkiksi $^{137}_{55}$Cs-isotooppia sisältävä, säteilylähde geigerputken lähelle noin 5 cm:n etäisyydelle. Kokeile, pääseekö gammasäteily geigerputken eteen asetetun paperin sekä ohuen tai paksun alumiinilevyn läpi.

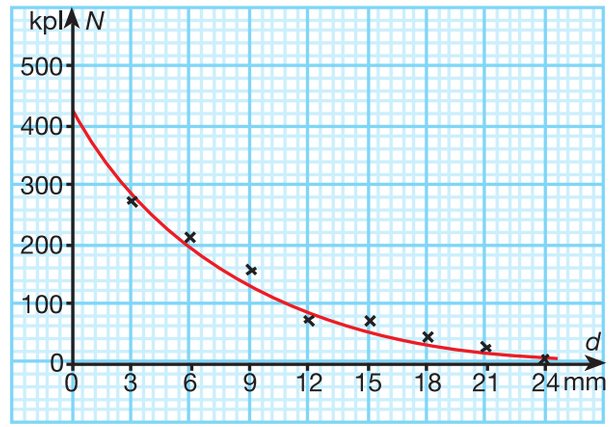
3. Aseta säteilylähteen ja ilmaisimen väliin alumiinilevy, joka estää lähteen emittoimia beetahiukkasia pääsemästä ilmaisimeen. Mittaa ilmaisimeen minuutissa saapuvien gammakvanttien (pulssien) määrä. Aseta sitten gammalähteen ja geigerputken väliin esimerkiksi 3,0 mm:n paksuinen lyijylevy ja mittaa sykäysten määrä yhden minuutin aikana. Lisää lyijylevyjä yksitellen ja toista aina mittaus. Huomioi taustasäteilyn vaikutus. Esitä graafisesti sykäysten määrä minuutissa lyijyn paksuuden funktiona. Arvioi kuvaajan perusteella, kuinka paksu lyijykerros pienentää läpi menneen säteilyn gammakvanttien lukumäärän puoleen.

Gammasäteily vuorovaikuttaa enimmäkseen atomien elektronien kanssa. Oppilastyön kohdassa 2 todetaan, että gammasäteily läpäisee helposti paperin ja alumiinilevyn, jotka molemmat koostuvat melko kevyistä alkuaineista, joissa on vähän elektroneja. Raskaiden alkuaineiden, kuten lyijyn, atomeissa on paljon elektroneja. Kohdassa 3 alumiinilevy läpäisee γ-säteilyn.

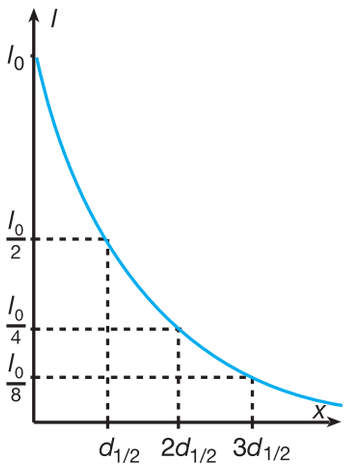
Ilmaisimen mittaama pulssimäärä on siis peräisin vain γ-kvanteista. Tämän perusteella todetaan, että gammasäteilyä voidaan tehokkaasti vaimentaa paksuilla, raskaista alkuaineista tehdyillä suojaimilla.

Oppilastyön kohdassa 3 saadusta kuvaajasta huomataan, että vajaan 6 mm:n lyijykerros säteilylähteen ja ilmaisimen välissä vähentää pulssimäärän likimain puoleen. Uudet, edellisen kanssa yhtä paksut lyijykerrokset vähentävät kukin pulssimäärän aina likimain puoleen edelliseen pulssimäärään verrattuna.

Pienen gammasäteilylähteen kuljetussäiliö.



$^{137}_{55}$Cs-isotoopin lähettämän γ-säteilyn pulssien määrä lyijyn paksuuden funktiona.

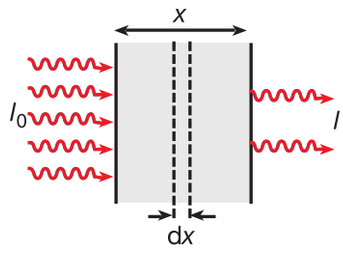


Gammasäteilyn intensiteetin *I* heikkeneminen absorboivan aineen paksuuden *x* funktiona.

Gammasäteilyn vaimenemista väliaineessa tarkastellaan tavallisesti intensiteetin avulla. Intensiteetti on säteilyteho pinta-alaa kohden, $I = P/A$. Gammasäteilyn intensiteetti vähenee väliaineessa eksponentiaalisesti, kuten oppilastyössä mitattu pulssimäärä. Gammasäteilyllä ei ole mitään tiettyä kantamaa.

Puoliintumispaksuudeksi $d_{1/2}$ sanotaan sitä väliaineen paksuutta, joka vähentää γ-säteilyn intensiteetin puoleen. Esimerkiksi noin 5 MeV:n gammasäteilyn puoliintumispaksuus on ilmassa 170 m, vedessä 23 cm, betonissa 11 cm ja lyijyssä 1,5 cm.

Heikennyslaki



Mittaamalla gammasäteilyn etenemistä väliaineessa voidaan osoittaa, että ohuessa ainekerroksessa Δx tapahtuva intensiteetin väheneminen ΔI on suoraan verrannollinen tähän kerrokseen saapuvan säteilyn intensiteettiin I ja kerroksen paksuuteen Δx eli $\Delta I = -\mu I \Delta x$. Verrannollisuuskerroin μ on matkavaimennuskerroin, joka riippuu väliaineesta ja säteilyn energiasta. Matkavaimennuskertoimen yksikkö on 1/m. Etumerkillä ilmaistaan säteilyn vaimeneminen. Kun ΔI ja Δx ovat pieniä, voidaan kirjoittaa $\mathrm{d}I = -\mu I \mathrm{d}x$, josta voidaan integroimalla johtaa heikennyslaki $I = I_0 e^{-\mu x}$.

Gammasäteilyn heikennyslaki
Gammasäteilyn intensiteetti väliaineessa etenemismatkan funktiona on

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

jossa I on ainekerroksen läpäisseen säteilyn intensiteetti, I_0 aineeseen osuvan gammasäteilyn intensiteetti, x ainekerroksen paksuus ja μ matkavaimennuskerroin.

Esimerkki 5

Betoniseinän paksuus on 55 cm. Seinä absorboi noin 97,0 % gammasäteilystä. Kuinka monta prosenttia gammasäteilystä pääsee 15 cm paksun betoniseinän läpi?

$I = 0{,}030\, I_0, \quad x_1 = 0{,}55 \text{ m}, \quad x_2 = 0{,}15 \text{ m}$

Lasketaan ensin heikennyslain avulla gammasäteilyn matkavaimennuskerroin betonissa. Heikennyslain mukaan intensiteetti betonissa syvyydellä x_1 on $I = I_0 e^{-\mu x_1}$, jossa I_0 on betonin pintaan osuvan säteilyn intensiteetti ja μ on matkavaimennuskerroin betonissa. Tällöin läpi menneen ja pintaan tulevan säteilyn intensiteettien suhde on $\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x_1}$. Otetaan yhtälön molemmilta puolilta luonnolliset logaritmit ja sievennetään yhtälön oikeaa puolta: $\ln \frac{I}{I_0} = \ln e^{-\mu x_1} = -\mu x_1 \ln e = -\mu x_1$.

Matkavaimennuskerroin on

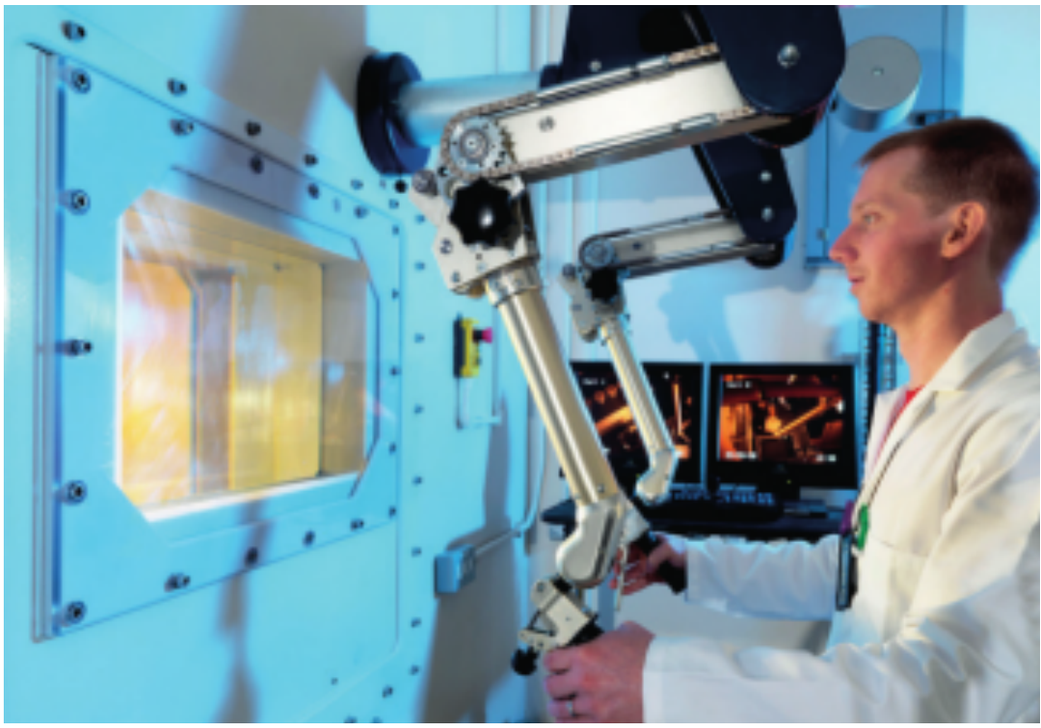
$$\mu = -\frac{\ln \frac{I}{I_0}}{x_1} = -\frac{\ln \frac{0{,}030 I_0}{I_0}}{0{,}55\ \text{m}} = -\frac{\ln 0{,}030}{0{,}55\ \text{m}} \approx 6{,}375560\ \frac{1}{\text{m}}.$$

15 cm paksun betoniseinän läpi menevän gammasäteilyn intensiteetti on

$$I = I_0 e^{-\mu x_2} = I_0 e^{-6{,}375560\ \frac{1}{\text{m}} \cdot 0{,}15\ \text{m}} = 0{,}38 I_0.$$

Gammasäteilystä 38 % pääsee betoniseinän läpi.

Gammakuvausta varten elimistöön ruiskutetaan radioaktiivista merkkiainetta.

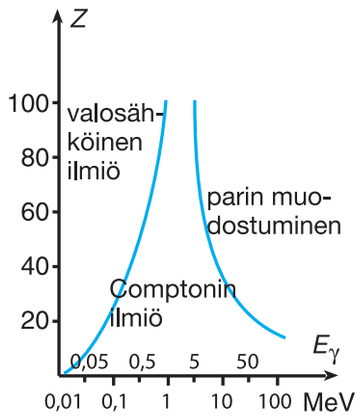


Seinän takana olevaa ydinsäteilylähdettä käsitellään robotin avulla.

Gammasäteily on läpitunkevaa. Siksi sitä käytetään läpivalaisuun lääketieteessä ja tekniikassa. Gammasäteily on vaarallista elävälle kudokselle. Erityisesti jakautumisvaiheessa olevat solut ovat erityisen herkkiä säteilyvaurioille. Syöpäsolut jakautuvat aktiivisesti, joten niiden tuhoamiseen voidaan käyttää gammasäteilyä.

Hyvin voimakas gammasäteily tappaa elävät solut nopeasti. Gammasterilointilaitoksissa steriloidaan gammasäteilyn avulla mm. kertakäyttöisiä sairaanhoitotarvikkeita. Elintarvikkeita, kuten perunoita, jyviä, hedelmiä ja mausteita, säteilytetään itämisen estämiseksi tai mikrobien vähentämiseksi. Elintarvikkeiden säteilyttämistä rajoitetaan monissa maissa lainsäädännöllä. Säteilytetty aine ei muutu steriloinnissa säteileväksi.

Radioaktiivisuutta ja ydinsäteilyä hyödynnetään nykyään esimerkiksi lääketieteessä erilaisina hoitokeinoina ja monenlaisina kehon sisäosien kuvantamismenetelminä. Näissä molemmissa radioaktiivisuuden hyödyntämistarkoituksissa menetelmät perustuvat eri ydinsäteilylajien erilaiseen absorptioon ja läpäisyyn esimerkiksi luustossa ja pehmeissä kudoksissa. Koska säteily läpäisee eri materiaaleja eri tavoin, radioaktiivisia aineita voidaan hyödyntää myös esimerkiksi ohuiden kalvojen ja paperien paksuuden mittauksissa.

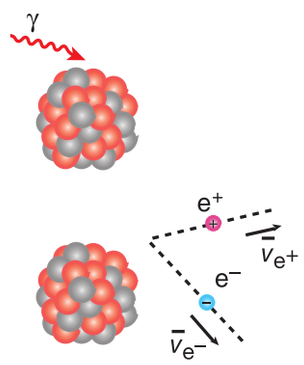


Alueiden rajoilla ilmiöiden todennäköisyys on yhtä suuri.

Gammasäteilyn ja aineen vuorovaikutustapoja

Gammasäteilyn eteneminen voidaan selittää aaltomallin avulla ja sen vuorovaikutus aineen kanssa hiukkasmallin avulla. Gammasäteilyn vuorovaikutus aineen kanssa riippuu säteilyn energiasta ja aineen järjestysluvusta. Gammasäteily voi vuorovaikuttaa aineen kanssa kolmella tavalla: kun gammasäteily osuu aineeseen, se menettää energiaa valosähköisessä ilmiössä, Comptonin ilmiössä ja parinmuodostuksessa. Luvussa 1 tarkasteltiin valosähköistä ilmiötä ja Comptonin ilmiötä (ks. s. 17 ja 24).

Parinmuodostuksessa säteilyenergiaa muuttuu aineeksi. Riittävän suurienergiainen fotoni, gammakvantti, voi muuttua atomin ytimen lähellä elektroniksi ja positroniksi (hiukkas-antihiukkaspariksi) sekä näiden liike-energiaksi. Jotta näin voisi tapahtua, fotonin energian on oltava suurempi kuin $2m_0c^2 \approx 1{,}0219981$ MeV, jossa m_0 on elektronin lepomassa. Elektroni-positroniparin syntyä kuvaa yhtälö



$$\gamma \rightarrow {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e}.$$

Parinmuodostus on tavallinen aineen ja säteilyn vuorovaikutustapa lyhytaaltoisen γ-säteilyn alueella.

Parinmuodostusta seuraa aineessa aina parin häviäminen eli positroni kohtaa elektronin, jolloin tapahtuu annihilaatio. Parinmuodostus ja annihilaatio ovat osoituksia Einsteinin suhteellisuusteorian mukaisesta aineen ja energian ekvivalenssista.

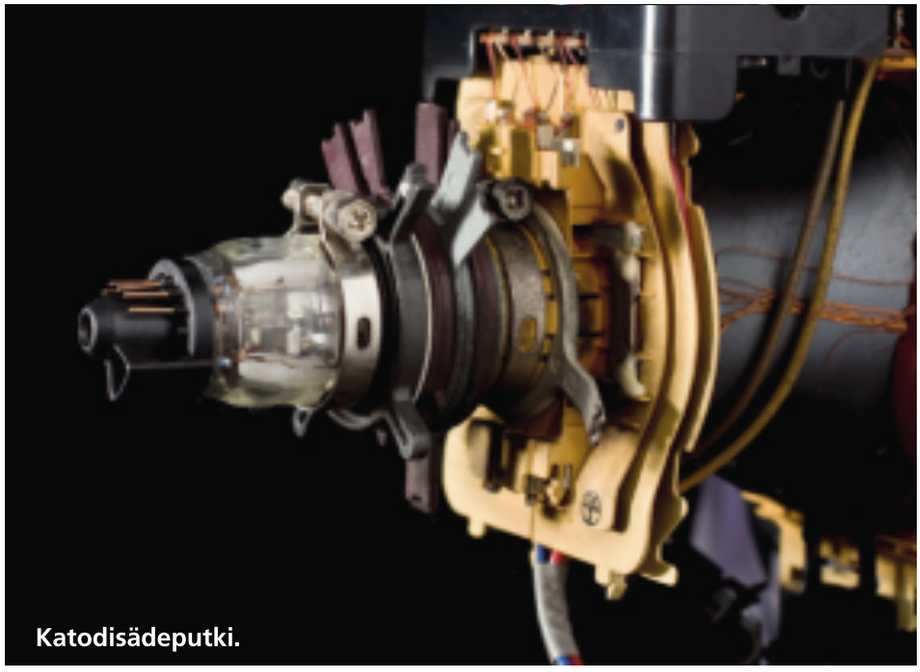
Gammasäteilyn intensiteetti aineessa heikkenee vähitellen edellä mainittujen vuorovaikutuksien vuoksi. Aineen kyky absorboida γ-säteilyä kasvaa aineen järjestysluvun kasvaessa. Siksi raskaat alkuaineet, kuten lyijy, absorboivat säteilyä tehokkaasti. Heikennyslaissa oleva matkavaimenemiskerroin kuvaa kaikkien mainittujen vuorovaikutusten yhdessä aiheuttamaa säteilyn heikkenemistä. Säteilyn intensiteetti heikkenee myös etäisyyslain $I \sim \frac{1}{r^2}$ mukaan, jos säteilyn vuorovaikutusta aineen kanssa ei oteta huomioon.

Gammasäteily ja aine

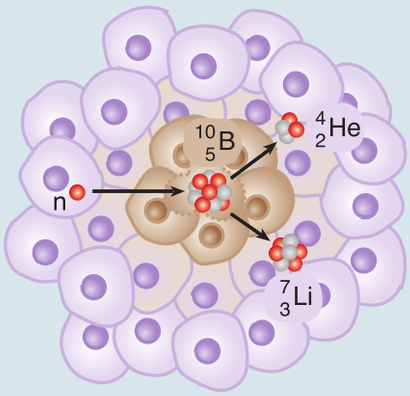
Gammasäteily voi vuorovaikuttaa aineen kanssa kolmella tavalla: valosähköisessä ilmiössä, Comptonin ilmiössä ja parinmuodostuksessa.

Parinmuodostuksessa säteilyenergiaa muuttuu aineeksi. Parinmuodostus ja annihilaatio ovat osoituksia Einsteinin suhteellisuusteorian mukaisesta aineen ja energian ekvivalenssista.

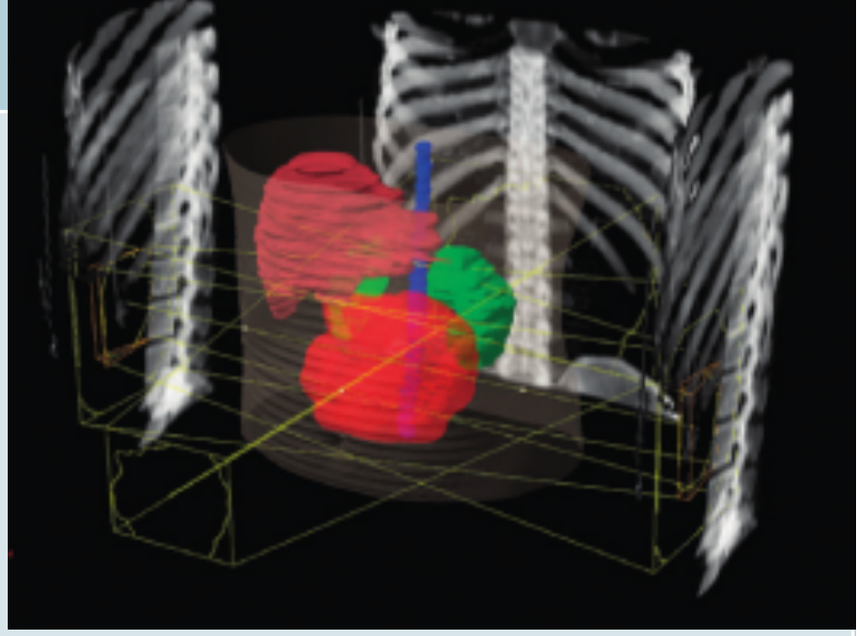
Pullossa oleva aine lähettää gammasäteilyä ja röntgenputki röntgensäteilyä. Huomaa lasi säteilylähteen ja työskentelijän välissä. Gammasäteilyn ja röntgensäteilyn syntytapa on erilainen, mutta ne vuorovaikuttavat aineen kanssa samalla tavalla, jos niiden aallonpituudet ovat yhtä suuret.



Katodisädeputki.



Syöpäsolun sisällä syntyy booriatomin hajotessa gammasäteilyä.



Sädehoitosuunnitelma imusolmukesyövän (punainen) tuhoamiseksi.

Syövän sädehoito kehittyy

Syövän sädehoidossa syöpäkasvaimeen kohdistetaan usein eri suunnista gamma- tai beetasäteilyä. Tällöin terveet kudokset saavat pienemmän säteilyannoksen kuin jos säteilytys kohdistettaisiin kasvaimeen vain yhdestä suunnasta. Silti suuri määrä terveitä soluja altistuu säteilylle.

Syöpäsolut tarvitsevat jakaantuakseen runsaasti fenyylialaniinia, joten sen pitoisuus syöpäsoluissa on huomattavasti suurempi kuin terveissä soluissa.

Boorineutronisädehoidossa (BNCT, *Boron Neutron Capture Therapy*) ^{10}B-isotooppi kulkeutuu verenkierrossa fenyylialaniinin avulla potilaan syöpäkasvaimeen. BNCT-hoito perustuu booriatomien erityiseen kykyyn reagoida neutronien kanssa. Kun booria on kertynyt riittävästi kasvaimeen, siihen kohdistetaan sopivasti hidastetut neutronit. Kasvaimessa ^{10}B-ytimet absorboivat (kaappaavat) neutroneja, minkä seurauksena booriytimet hajoavat ja syntyy gammasäteilyä: $n + {}^{10}_{5}B \rightarrow {}^{7}_{3}Li + {}^{4}_{2}He + \gamma$.

Syöpäsolujen sisällä syntyvän gammasäteilyn kantama on lyhyt. Säteily ja ydinreaktiossa syntyvät ytimet tuhoavat mm. syöpäsolun dna:ta, ja syöpäsolu tuhoutuu. Hoidosta saatava säteilyvaikutus rajoittuu melkein kokonaan syöpäsoluun, eli terveet solut eivät vaurioidu. Hoidossa käytettävä neutronisäteily aiheuttaa potilaalle vain pienen säteilyannoksen, sillä varauksettomat neutronit reagoivat heikosti läpäistessään potilaan.

Boorineutronisädehoidolla hoidetaan esimerkiksi pään ja kaulan alueen pitkälle edenneitä syöpäkasvaimia, samoin pahanlaatuisia aivokasvaimia.

VTT-tutkimuslaitoksen Otaniemessä sijaitsevassa ydinreaktorissa uraaniytimiä halkaistaan neutronien avulla: fissiossa vapautuu uusia neutroneja, jotka ohjataan BNCT-hoidossa reaktorin seinässä olevan aukon kautta potilaaseen. Neutronisäteilyn tuottaminen on ongelmallisempaa kuin gamma- ja beetasäteilyn tuottaminen. Tulevaisuudessa hiukkaskiihdyttimien uskotaan syrjäyttävän ydinreaktorit boorineutronihoidossa käytettävien neutronien tuottamisessa.

Pohdi ja etsi

5-22. a) Alfa-aktiivinen aine ympäröidään alumiinifoliolla. Miksi säteilyä voidaan havaita folion ulkopuolella, vaikka alfahiukkanen pysähtyy alumiinifolioon?
b) Millä tavalla ihmisille tarkoitettu säteilysuoja tulisi rakentaa, jotta se pysäyttäisi
1) γ-säteilyn 2) kaikki säteilyt?

5-23. a) Miksi geigerputkella voi helposti havaita gammasäteilyä?
b) Miksi gammasäteilyn eteneminen esimerkiksi ihmisen kehon sisällä on likimain samanlaista kuin gammasäteilyn eteneminen vedessä?
c) Miksi säteilymittari näyttää vanhojen rannekellojen lähellä joskus suurempaa lukemaa kuin muualla huoneessa?

5-24. a) On todettu, että kaikki radioaktiiviset aineet lähettävät gammasäteilyä. Mitä tämä tarkoittaa?
b) Gamma- ja röntgensäteily ovat molemmat peräisin atomin viritystilojen purkautumisesta. Mitä eroa näillä viritystiloilla on?

5-25. a) Kehon sisällä olevaa syöpäkudosta voidaan tuhota kohdistamalla kasvaimeen gammasäteilyä ihon läpi. Säteily vaimenee syvyyden kasvaessa. Miten säteilyn vaikutus saadaan kehon sisällä olevassa kasvaimessa suuremmaksi kuin ihon pinnassa, johon säteily ensiksi osuu?
b) Lääketieteessä käytetään ns. isotooppikuvausta. Siinä kudokseen syötetään radioaktiivista ainetta. Miksi jonkin kudoksen tai elimen toiminnallinen muutos saadaan selville isotooppikuvauksella paljon aikaisemmin kuin kudoksen tai elimen geometrinen muutos näkyy röntgenkuvassa?

Tehtäviä

5-26. Tietyn taajuisen gammasäteilyn puoliintumispaksuus vedessä on 25 cm.
a) Kuinka suuri osa gammakvanteista pääsee veden läpi, jos vesikerroksen paksuus on 75 cm?
b) Gammalähde on veden alla pohjassa. Mikä on vesikerroksen paksuus, kun gammakvanttien määrä lähteen yläpuolella on noin tuhannesosa alkuperäisestä?
1) 2,5 m 2) 5,0 m 3) 250 m

5-27. Radioaktiivisen säteilyn vaimenemista alumiinissa tutkitaan asettamalla säteilylähteen ja tuikeilmaisimen väliin eri määriä 6,0 mm paksuja alumiinilevyjä ja mittaamalla läpi päässeen säteilyn voimakkuus pulsseina aikayksikössä. Taulukko esittää havaittuja, taustasäteilyn suhteen korjattuja pulssimääriä N alumiinikerroksen paksuuden x funktiona.

x (mm)	N (pulssia/2 min)
0,0	38 791
6,0	35 101
12,0	31 608
18,0	28 476
24,0	25 711
30,0	22 738

Minkä paksuinen alumiinikerros riittää vaimentamaan tässä kokeessa käytetyn säteilylajin voimakkuuden puoleen? [Oulun yliopisto 1994]

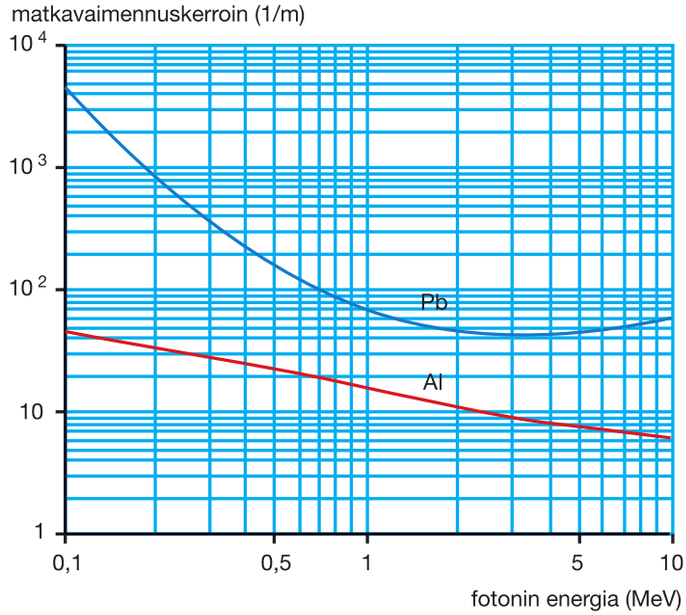
5-28. Gammasäteilyn matkavaimennuskerroin lyijyssä on 46 $\frac{1}{\text{m}}$. Kuinka monta prosenttia gammasäteilystä menee 6,0 mm paksun lyijylevyn läpi?

5-29. 23 cm:n paksuinen vesikerros pienentää gammasäteilyn intensiteetin puoleen.
a) Laske veden matkavaimennuskerroin.
b) Kuinka monta prosenttia gammasäteilystä pääsee 2,0 m paksun vesikerroksen läpi?

5-30. Gammasäteilyn puoliintumispaksuus on 5,0 cm pehmyttä kudosta. Verisuoni, jossa on tätä gammasäteilyä lähettävää radioaktiivista ainetta, sijaitsee 8,0 cm:n syvyydellä ihon pinnasta. Kuinka suureen osaan alkuperäisestä määrästä säteily vaimenee tällä matkalla pehmyttä kudosta:
1) noin 1/3 2) noin 2/5
3) noin 1/4 4) noin 2/3?
[Lääk. 1998]

5-31. Johda gammasäteilyn heikennyslaista $I = I_0 e^{-\mu x}$ lähtien puoliintumispaksuudelle yhtälö $d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$.

5-32. Oheisessa kuvassa on esitetty gammasäteilyn matkavaimennuskerroin lyijyssä ja alumiinissa fotonin energian funktiona.
a) Lyijylevyistä halutaan rakentaa säteilysuoja, joka heikentää 2,6 MeV:n gammasäteilyn voimakkuuden 10 prosenttiin alkuperäisestä. Kuinka paksu lyijykerros tarvitaan?
b) Kuinka suuri osa säteilystä absorboituisi a-kohdassa lasketun paksuisessa alumiinikerroksessa?



5-33. Pistemäisestä lähteestä tulevan gammasäteilyn voimakkuutta mitattiin geigerputkella. Kun putken etäisyyttä säteilylähteestä muutettiin, laskentataajuus I pieneni oheisen taulukon mukaisesti.

r/cm	8	10	15	20	25	30	35	40	50
I(pulssia/s)	656	420	187	104	67	47	34	25	17

a) Piirrä $I = I(r)$ -kuvaaja.
b) Millainen matemaattinen riippuvuus näyttää vallitsevan säteilyn voimakkuuden ja etäisyyden välillä?
c) Selitä, miksi laskentataajuus pienenee em. tavalla, vaikka ilma ei juuri absorboi gammasäteilyä.

Testaa, osaatko

Oikeita vastausvaihtoehtoja voi olla yksi tai useampia.

1. Radioaktiivisen aineen
a) lähettämä säteily on heikkonakin aistein havaittavissa
b) atomien ytimet hajoavat spontaanisti
c) esiintyminen luonnossa on harvinaista.

2. Alfa-aktiivisen $^{209}_{84}$Po-isotoopin tytärydin on
a) elohopea
b) tallium
c) lyijy.

3. Tietyn nuklidin alfahajoamisissa
a) kaikkien α-hiukkasten liike-energiat ovat yhtä suuria
b) α-hiukkaset voivat saada vain tiettyjä kvantittuneita liike-energian arvoja
c) α-hiukkasten liike-energialla voi olla mitä tahansa arvoja tietyllä energiavälillä.

4. Beetasäteilyä syntyy, kun
a) neutroni muuttuu protoniksi
b) α-hiukkaset irrottavat elektroneja atomin elektroniverhosta
c) protoni muuttuu atomin ytimessä neutroniksi.

5. Mitkä seuraavista väitteistä ovat totta?
a) β^--hajoamisen yhteydessä atomin ydin emittoi elektronin ja neutriinon.
b) β^+-hajoamisen yhteydessä yksi atomin ytimen protoni muuttuu heikon vuorovaikutuksen takia neutroniksi. Samalla ydin emittoi positronin ja neutriinon.
c) Gammasäteilyä syntyy atomin ytimen viritystilan purkautuessa. Gammasäteily on hyvin läpitunkevaa.

6. Hopea-isotoopin ^{106}Ag radioaktiivisessa hajoamisreaktiossa syntyvä alkuaine on
a) ^{106}Pd b) ^{106}Cd c) ^{102}Rh.

7. Beetahajoamisessa β-hiukkasten energiaspektri
a) on jatkuva
b) osoittaa, että ytimellä ei voi olla kvantittuneita energiatiloja
c) osoittaa, että ytimestä emittoituu β:n lisäksi muukin hiukkanen.

8. Polonium-205:n hajoamisreaktio voi olla
a) $^{205}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{205}_{83}\text{Bi} + {}^{0}_{+1}\text{e} + \nu$
b) $^{205}_{84}\text{Po} + {}^{0}_{-1}\text{e} \rightarrow {}^{205}_{83}\text{Bi} + \nu$
c) $^{205}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{205}_{85}\text{At} + {}^{0}_{-1}\text{e} + \overline{\nu}$.

9. Elektronin ja positronin annihilaatiossa syntyy
a) yksi gammakvantti
b) kaksi gammakvanttia
c) yksi tai kaksi gammakvanttia.

10. Elektronisieppauksessa
a) atomin ytimen lähellä oleva elektroni joutuu ytimeen
b) alkuaine muuttuu toiseksi alkuaineeksi samalla tavalla kuin β^+-hajoamisessa
c) emittoituu antineutriino.

11. Gammasäteilyn matkavaimennuskerroin eräälle betonityypille on 6,2 $\frac{1}{\text{m}}$. Gammasäteilystä pääsee 0,45 m paksun betoniseinän läpi
a) 0,61 % b) 6,1 % c) 61 %.

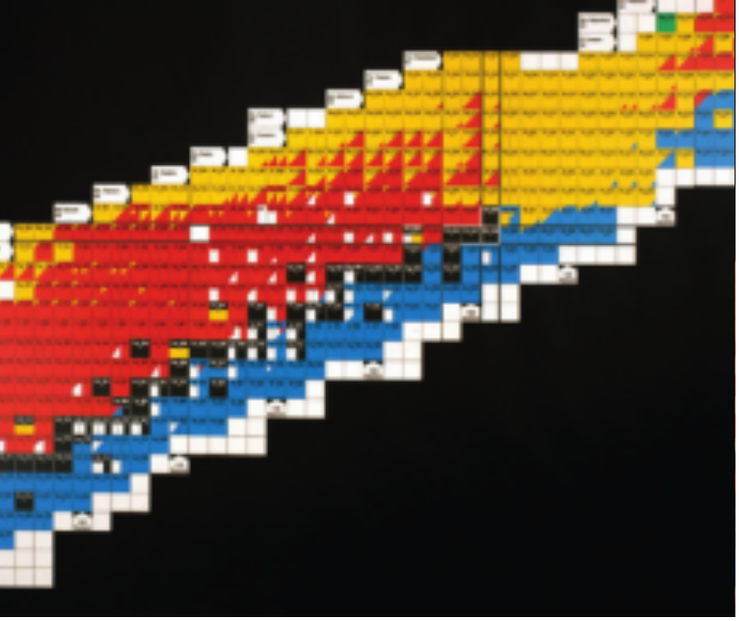
Tiivistelmä

- Radioaktiivisen aineen ytimet lähettävät hajotessaan ydinsäteilyä eli alfa-, beeta-, gamma- tai neutronisäteilyä.
- Alfa-, beeta-, gamma- ja neutronisäteily ovat peräisin ydinreaktioista.
- Hajoamisenergia Q vastaa lähtö- ja tulosydinten massojen erotusta eli massavajetta.
- Alfahajoamisessa ${}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$ atomin ydin emittoi α-hiukkasen, joka vastaa rakenteeltaan ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$-ydintä. Samalla emittoituu yleensä γ-säteilyä.
- Alfahajoamisessa emittoituneet α-hiukkaset voivat saada vain tiettyjä kvantittuneita arvoja.
- Ytimissä on tiettyjä kvantittuneita energiatiloja.
- β^--hajoamisessa atomin ytimen neutroni muuttuu protoniksi ja elektroniksi: ${}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{p} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$. Ydin emittoi elektronin ja antineutriinon: ${}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}\mathrm{Y} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$.
- β^+-hajoamisessa atomin ytimen protoni muuttuu neutroniksi ja positroniksi: ${}^{1}_{1}\mathrm{p} \rightarrow {}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \nu$. Ydin emittoi positronin ja neutriinon: ${}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \nu$.
- Beetasäteilyssä syntyvien elektronien ja positronien energiaspektri on jatkuva.
- Elektronisieppauksessa atomin ytimeen siirtynyt elektroni ja yksi ytimen protoneista muodostavat neutronin ja neutriinon: ${}^{1}_{1}\mathrm{p} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{1}_{0}\mathrm{n} + \nu$. Ydin emittoi neutriinon: ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}_N + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y}_{N+1} + \nu$.
- Gammasäteilyä esiintyy alfa- ja beetahajoamisen yhteydessä. Kun tytärydin siirtyy viritystilasta alempaan viritystilaan tai perustilaan, ytimestä emittoituu gammakvantti.
- Puoliintumispaksuudeksi $d_{1/2}$ sanotaan sitä väliaineen paksuutta, joka vähentää γ-säteilyn intensiteetin puoleen.
- Gammasäteilyn vaimeneminen aineessa noudattaa heikennyslakia $I = I_0 e^{-\mu x}$.
- Annihilaatio ${}^{0}_{+1}\mathrm{e} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow 2\gamma$ ja parinmuodostus $\gamma \rightarrow {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e}$ ovat osoituksia aineen ja energian ekvivalenssista.
- Gammasäteily voi vuorovaikuttaa aineen kanssa kolmella tavalla: valosähköisessä ilmiössä, Comptonin ilmiössä ja parinmuodostuksessa.

6 Hajoamislaki

Tässä luvussa opit
- **hajoamissarjat**
- **hajoamislain**
- **radiohiiliajoituksen**
- **säteilyturvallisuutta.**

Keskeisiä käsitteitä ovat
- **hajoamisvakio**
- **puoliintumisaika**
- **ionisoiva säteily**
- **taustasäteily.**

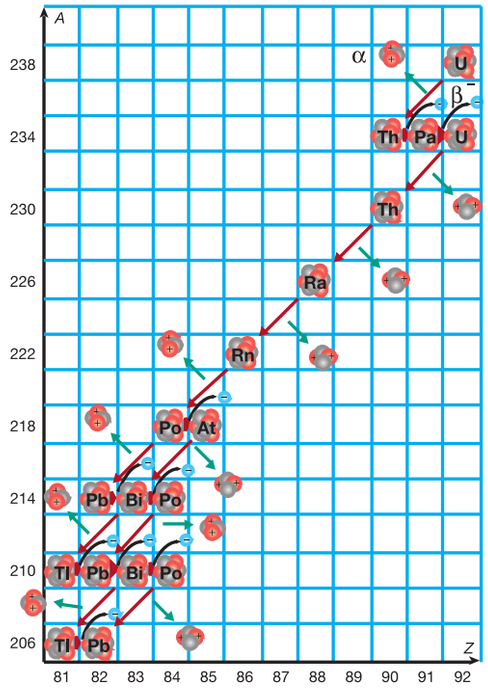


Nykyään tunnetaan yli sata alkuainetta ja yli 3 700 eri isotooppia. Nuklidikartassa stabiilit isotoopit on merkitty mustalla ja värilliset ovat radioaktiivisia isotooppeja.

Graniitti sisältää uraania, joka lähettää ydinsäteilyä.

6.1 Aktiivisuus ja hajoamislaki

Hajoamissarjat



Uraanin hajoamissarja. Uraanisarjan lopussa on pysyvä lyijyn isotooppi $^{206}_{82}\mathrm{Pb}$.

Raskaimmat alkuaineet ovat syntyneet suurimpien tähtien elämän päättävissä supernovaräjähdyksissä. Silloin ovat syntyneet myös Maassa esiintyvät pitkäikäiset, raskaat radioaktiiviset nuklidit. Tällaisia nuklideja on vieläkin paljon jäljellä, ja niistä ovat lähtöisin luonnossa esiintyvät radioaktiiviset **hajoamissarjat**. Hajoamissarja syntyy, kun pitkäikäisen emoytimen hajotessa syntyvä tytärydin on myös radioaktiivinen: hajoaminen jatkuu, kunnes ketjun päässä on vihdoin **pysyvä** eli **stabiili ydin**. Yksittäisten nuklidien hajoamisajankohtaa ei voida tietää ennalta, mutta suuren ydinjoukon muuttumista toisiksi ytimiksi voidaan ennustaa tilastollisesti.

Beetahajoaminen muuttaa ytimen järjestyslukua yhdellä. Ytimen massaluku muuttuu vain alfahajoamisessa, jossa massaluku pienenee neljällä ja järjestysluku kahdella. Kussakin hajoamissarjassa esiintyvien nuklidien massaluvut ovat siten neljän välein.

Aktiivisuus

Aineen radioaktiivisten ytimien määrä vähenee hajoamisten myötä, joten säteily heikkenee eli radioaktiivisen aineen **aktiivisuus** pienenee ajan kuluessa. Aktiivisuus kuvaa ytimien hajoamisnopeutta. Radioaktiivisen näytteen **keskimääräinen aktiivisuus**

saadaan jakamalla näytteessä tapahtuvien hajoamisten määrä hajoamiseen kuluneella ajalla. Aktiivisten ytimien lukumäärän muutos ΔN on negatiivinen, ja on sovittu, että aktiivisuus ilmoitetaan positiivisena eli $A \geq 0$, joten $A = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = \left|\frac{\Delta N}{\Delta t}\right|$.

Aktiivisuus
Aktiivisuus kuvaa ytimien hajoamisnopeutta.
Radioaktiivisen näytteen keskimääräinen aktiivisuus on ydinten hajoamisten lukumäärä aikayksikössä:

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = \left|\frac{\Delta N}{\Delta t}\right|,$$

jossa ΔN on ytimien määrän muutos ja Δt hajoamisiin kulunut aika.

SI-järjestelmässä aktiivisuuden yksikkö on $[A] = \frac{1}{1\,\mathrm{s}} = 1\,\frac{1}{\mathrm{s}} = 1$ Bq (becquerel). Aktiivisuuden yksikkö on nimetty beetasäteilyn löytäjän, ranskalaisen fyysikon *Henry Becquerelin* (1852–1908) mukaan. Jos näytteen aktiivisuus on 1 Bq, näytteessä tapahtuu keskimäärin yksi hajoaminen sekunnissa.

Kun on tutkittu saman isotoopin erikokoisia näytteitä, on havaittu, että hetkellinen aktiivisuus on suoraan verrannollinen hajoavien ytimien määrään. Aktiivisuus on $A = \lambda N$, jossa λ on hajoamisvakio.

Radioaktiivisen näytteen hetkellinen aktiivisuus
Radioaktiivisen näytteen hetkellinen aktiivisuus on suoraan verrannollinen hajoavien ytimien määrään N, eli

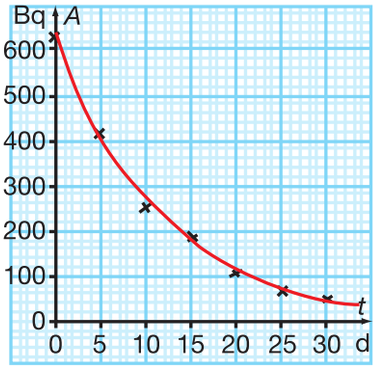
$$A = \lambda N,$$

jossa λ on hajoamisvakio.

Hajoamisvakion yksikkö on $[\lambda] = \frac{[A]}{[N]} = \frac{1/\mathrm{s}}{1} = 1\,\frac{1}{\mathrm{s}}$. Hajoamisvakio on kullekin radioaktiiviselle isotoopille ominainen ja kuvaa todennäköisyyttä, jolla atomin ydin hajoaa aikayksikössä. Tämä todennäköisyys ei riipu radioaktiivisten ytimien iästä eikä ulkoisista olosuhteista. Radioaktiivisuus ei vähene eikä puoliintumisaika lyhene, jos radioaktiivisia aineita esimerkiksi poltetaan.

Palovaroittimen amerikiumin (Am-241) aktiivisuus on alle 40 kBq, ihmisen elimistössä olevan radiumin noin 3 Bq ja kaliumin 2 500–6 000 Bq. Mikäli asuinhuoneen radonpitoisuus alittaa 200 Bq/m^3, radonturvallisuutta pidetään riittävänä. Jos yksityisessä käytössä olevan kaivon veden radonpitoisuus ylittää 1 000 Bq/l, sitä pidetään merkittävänä terveysriskinä.

Hajoamislaki



$^{131}_{53}$I-isotoopin aktiivisuuden väheneminen eksponentiaalisesti.

Radioaktiivisen näytteen aktiivisuuden vähenemistä ajan kuluessa voidaan seurata säteilymittarilla. Kun mittaustulokset siirretään (t, A)-koordinaatistoon, huomataan, että aktiivisuuden väheneminen noudattaa eksponenttilakia.

Koska aktiivisuus on $A = \lambda N$ ja toisaalta $A = -\dfrac{\Delta N}{\Delta t}$, hyvin lyhyellä aikavälillä $\mathrm{d}t$ näytteen aktiivisuus on $A = -\dfrac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t} = \lambda N$, jossa $\mathrm{d}N$ on aikavälillä $\mathrm{d}t$ hajoavien ytimien määrä. Ratkaistaan aktiivisten ytimien määrä $N = N(t)$ hetkellä t integroimalla yhtälö $\dfrac{\mathrm{d}N}{N} = -\lambda \mathrm{d}t$ puolittain. Kun näyte sisältää hetkellä $t = 0$ N_0 aktiivista ydintä, saadaan yhtälö

$$\int_{N_0}^{N} \frac{\mathrm{d}N}{N} = -\int_{0}^{t} \lambda \mathrm{d}t$$

$$\Big/_{N_0}^{N} \ln N = -\Big/_{0}^{t} \lambda t$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda(t - 0)$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Aktiivisten ytimien määrä hetkellä t on $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$.

Toisaalta aktiivisuus kuvaa ytimien hajoamisnopeutta, joten aktiivisuus on

$$A(t) = \frac{\mathrm{d}(N(t))}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}(N_0 e^{-\lambda t})}{\mathrm{d}t} = -(-\lambda)N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}.$$

Radioaktiivisen aineen hajoamislaki
Radioaktiivisten ydinten lukumäärä hetkellä t on

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

jossa N_0 on ydinten lukumäärä hetkellä $t = 0$ ja λ on hajoamisvakio.
Radioaktiivisen näytteen aktiivisuus hetkellä t on

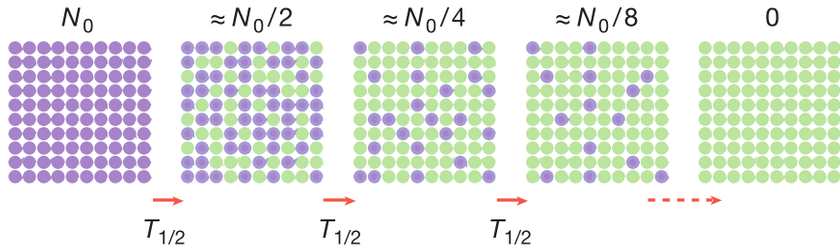
$$A = A_0 e^{-\lambda t},$$

jossa A_0 on aktiivisuus hetkellä $t = 0$ ja λ on hajoamisvakio.

Huomaa, että hajoamislaki pätee tietylle radioaktiiviselle isotoopille – ei sellaiselle näytteelle, joka sisältää useita radioaktiivisia isotooppeja.

Puoliintumisaika

Radioaktiivisten isotooppien hajoamisen nopeutta kuvaa hajoamisvakion lisäksi myös **puoliintumisaika** $T_{1/2}$. Puoliintumisajan kuluessa noin puolet alussa olleista radioaktiivisista ytimistä hajoaa. Jos alkuhetkellä aktiivisten ytimien määrä on N_0, hetkellä $t = T_{1/2}$ hajoamatta on noin $N_0/2$ ydintä eli 50 % alkuperäisistä. Hetkellä $t = k \cdot T_{1/2}$ hajoamatta on noin $N_0/2^k$ ydintä.

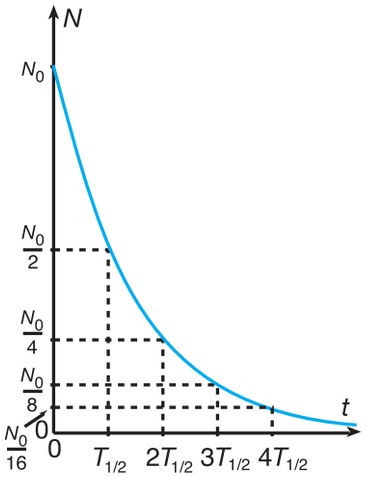


Tutkitaan, mikä yhteys on hajoamisvakiolla ja puoliintumisajalla. Yhden puoliintumisajan kuluttua, kun $t = T_{1/2}$, noin puolet ytimistä on hajonnut.

Jäljellä olevien ytimien määrä on noin $N = \frac{N_0}{2}$ eli $\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$.
Jaetaan yhtälön molemmat puolet N_0:lla ja otetaan puolittain luonnollinen logaritmi:

$$\ln\frac{1}{2} = \ln e^{-\lambda T_{1/2}}$$
$$\ln 1 - \ln 2 = -\lambda T_{1/2} \cdot \ln e$$
$$0 - \ln 2 = -\lambda T_{1/2} \cdot 1.$$

Hajoamisvakion ja puoliintumisajan välille saadaan yhtälö $\ln 2 = \lambda T_{1/2}$ eli $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$.



Radioaktiivisen aineen jäljellä olevien ytimien määrä on esitetty puoliintumisaikojen avulla.

Puoliintumisaika ja hajoamisvakio
Puoliintumisajan kuluessa noin puolet alussa olleista radioaktiivisista ytimistä hajoaa.
Radioaktiivisen hajoamisen nopeutta kuvaavien hajoamisvakion λ ja puoliintumisajan $T_{1/2}$ välillä on yhtälö $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$.

Suomen kallioperä sisältää $^{238}_{92}$U-isotooppia, ja radium-226 kuuluu uraanin hajoamissarjaan. Radiumin tytärydin, radon-222, on alfa-aktiivinen kaasu, jota vapautuu maaperästä ilmakehään ja porakaivojen veteen. Sen puoliintumisaika on 3,825 d. Reaktioyhtälö on $^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\text{Po} + {}^{4}_{2}\text{He}$. Radonin hengittäminen kasvattaa keuhkosyöpäriskiä.

Korkeita radonpitoisuuksia on esimerkiksi soraharjualueilla.

Esimerkki 1

Radontutkimuksen mittauspurkkeja voi tilata säteilyturvakeskuksesta.

Radonpitoisuus tarkoittaa yhdessä kuutiometrissä ilmaa sekunnin aikana hajonneiden radonytimien määrää. Radonpitoisuuden yksikkö on 1 Bq/m^3. Oletetaan, että maasta nouseva radonpitoinen ilma täyttää huoneen eikä ilma pääse vaihtumaan ja että ilman radonpitoisuus 10 000 Bq/m^3 johtuu pelkästään radonisotoopista $^{222}_{86}$Rn. Uusien asuntojen huoneilman radonpitoisuuden tavoitearvon yläraja on 200 Bq yhdessä kuutiometrissä ilmaa (200 Bq/m^3). Kuinka kauan kestää, ennen kuin ilman aktiivisuus on alentunut tavoitearvoon?

Maaperän hiekka- ja savirakeiden välissä on ilmaa, jonka radonpitoisuus on likimain 10 000–1 000 000 Bq/m^3.

$T_{1/2} = 3{,}825$ d, $\quad A_0 = 10\,000$ Bq, $\quad A = 200$ Bq

Kirjoitetaan aktiivisuuden ilmaiseva yhtälö $A = A_0 e^{-\lambda t}$ muotoon $\frac{A}{A_0} = e^{-\lambda t}$, josta ratkaistaan aika t. Kun yhtälöstä otetaan puolittain logaritmit ja sievennetään, saadaan $\ln\frac{A}{A_0} = \ln e^{-\lambda t} = -\lambda t \ln e = -\lambda t$, josta aika on $t = \ln\frac{A}{A_0} : -\lambda$. Koska hajoamisvakio on $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ ajaksi saadaan

$$t = \frac{\ln\frac{A}{A_0}}{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}}} = \frac{\ln\frac{200\text{ Bq}}{10\,000\text{ Bq}}}{-\frac{\ln 2}{3{,}825\text{ d}}} \approx 22\text{ d}.$$

Aktiivisuus on alentunut tavoitearvoon 22 vuorokauden kuluttua.

Fukushiman ydinvoimalaitos vaurioitui Japanissa vuonna 2011 sattuneessa maanjäristyksessä. Voimalaitoksesta vapautui ilmaan ja veteen uraanin radioaktiivisia halkeamistuotteita, mm. jodi-131-isotooppia ($T_{1/2} = 8{,}02$ d) ja cesium-137-isotooppia ($T_{1/2} = 30{,}17$ a).

Esimerkki 2

Radioaktiivista radonkaasua ($^{222}_{86}\mathrm{Rn}$) muodostuu radiumisotoopin $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$ alfahajoamisen seurauksena.
a) Kirjoita reaktioyhtälö.
b) Laske radiumin hajoamisvakio.
c) Kuinka monta ydintä 1,0 gramman radiumnäytteessä hajoaa 1,0 sekunnin aikana?
d) Missä ajassa 90 % radiumytimistä on hajonnut?
e) Mikä on tämän radiumnäytteen aktiivisuus alussa ja d-kohdassa lasketun ajan kuluttua?

$T_{1/2} = 1\,600\ \mathrm{a}, \quad \Delta t = 1{,}0\ \mathrm{s}, \quad m = 1{,}0\ \mathrm{g},$
$N_\mathrm{A} = 6{,}0221367 \cdot 10^{23}\ 1/\mathrm{mol}, \quad M = 226{,}025402\ \mathrm{g/mol}$

a) Tytärydin radon $^{222}_{86}\mathrm{Rn}$ syntyy radiumista $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$, ja samalla vapautuu alfahiukkanen.

Reaktioyhtälö on $^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$.

b) Hajoamisvakio lasketaan puoliintumisajan avulla:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2}{1600\ \mathrm{a}} = \frac{\ln 2}{31{,}536 \cdot 10^6 \cdot 1600\ \mathrm{s}}$$
$$= 13{,}73722 \cdot 10^{-12}\ 1/\mathrm{s} \approx 14 \cdot 10^{-12}\ 1/\mathrm{s}.$$

Hajoamisvakio on $14 \cdot 10^{-12}\ 1/\mathrm{s}$.

c) Radiumin keskimääräinen aktiivisuus aikavälinä Δt on $A = -\dfrac{\Delta N}{\Delta t}$, jolloin radiumytimien lukumäärän muutos on $\Delta N = -\lambda N \Delta t$. Ainemäärä on $n = \dfrac{m}{M}$ ja ytimien lukumäärä $N = nN_\mathrm{A} = \dfrac{m}{M} N_\mathrm{A}$, jossa m on radiumin massa, M moolimassa ja N_A Avogadron vakio. Radiumytimien lukumäärän muutos 1,0 sekunnissa on

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t = -\lambda \frac{m}{M} N_\mathrm{A} \Delta t$$
$$= -13{,}73722 \cdot 10^{-12}\ \frac{1}{\mathrm{s}} \cdot \frac{1{,}0\ \mathrm{g}}{226{,}025402\ \mathrm{g/mol}} \cdot 6{,}0221367 \cdot 10^{23}\ \frac{1}{\mathrm{mol}} \cdot 1{,}0\ \mathrm{s}$$
$$= -36{,}60094 \cdot 10^9 \approx -37 \cdot 10^9.$$

Radiumytimiä hajoaa sekunnissa $37 \cdot 10^9$ kappaletta.

d) Kun 90 % ytimistä on hajonnut, jäljellä on 10 % alkuperäisistä ytimistä eli $N = 0{,}10\ N_0$.

Hajoamislain mukaan ajan t kuluttua ytimien lukumäärä on

$$N = N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \text{ eli } 0{,}10 N_0 = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Jaetaan yhtälö puolittain N_0:lla, ja koska hajoamisvakio on $\lambda = \dfrac{\ln 2}{T_{1/2}}$, yhtälö saa muodon $0{,}10 = e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}$. Otetaan yhtälöstä logaritmi puolittain, jolloin

$$\ln 0{,}10 = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t \cdot \ln e = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t.$$

Ratkaistaan kulunut aika:

$$t = \frac{\ln 0{,}10}{-\dfrac{\ln 2}{T_{1/2}}} = \frac{\ln 0{,}10}{-\dfrac{\ln 2}{1\,600\ \text{a}}} = 5\,315{,}085\ \text{a} \approx 5\,300\ \text{a}.$$

Radiumin ytimistä on hajonnut 90 % 5 300 vuodessa.

e) Aktiivisuus on hajoavien nuklidien lukumäärä aikayksikössä, eli c-kohdan mukaan aktiivisuus alussa on $36{,}60094 \cdot 10^9$ Bq $\approx 37 \cdot 10^9$ Bq.

Radiumnäytteen aktiivisuus hetkellä $t = 5315{,}085$ a on

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}$$

$$= 36{,}60094 \cdot 10^9\ \text{1/s} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{1600\,\text{a}} \cdot 5315{,}085\,\text{a}} \approx 3{,}7 \cdot 10^9\ \text{Bq}.$$

Radiumnäytteen aktiivisuus on alussa $37 \cdot 10^9$ Bq ja 5 300 vuoden kuluttua $3{,}7 \cdot 10^9$ Bq.

Pohdi ja etsi

6-1. Mistä tekijöistä johtuu
a) varauksisen hiukkassäteilyn
b) sähkömagneettisen säteilyn
c) neutronisäteilyn
vaarallisuus?

6-2. Vaikuttaako radioaktiivisen aineen ytimen hajoamisnopeuteen
a) lämpötila b) paine?

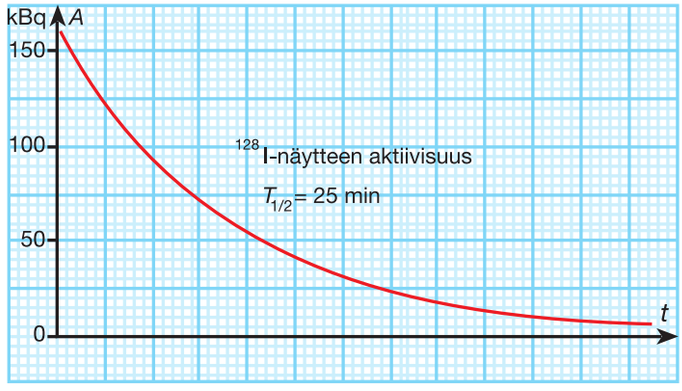
6-3. Kivenlohkareessa arvioidaan olevan 4,0 μg radium-226-isotooppia, jonka puoliintumisaika on 1 600 vuotta. Mitkä seuraavista väitteistä ovat oikein ja mitkä väärin? Perustele.
Lohkareessa
a) ei ole yhtään radiumia jäljellä 1 600 vuoden kuluttua
b) on radiumia jäljellä 1,0 μg 3 200 vuoden kuluttua
c) on ollut 8,0 μg radiumia 1 600 vuotta sitten.

6-4. Lääketieteellisissä tutkimuksissa käytetään jonkin verran radioaktiivisia merkkiaineita. Mitä haittaa potilaalle tai tutkimukselle on siitä, että
a) käytettävän merkkiaineen puoliintumisaika on pitkä
b) käytettävän merkkiaineen puoliintumisaika on lyhyt
c) käytettävä merkkiaine jakautuu tasaisesti koko kehoon eikä keräänny tiettyyn elimeen?

Tehtäviä

6-5. Näytteessä on aluksi 16 mg radioaktiivista isotooppia $^{24}_{11}\mathrm{Na}$, jonka puoliintumisaika on 14,96 h. Ovatko seuraavat väitteet oikein vai väärin? Perustele vastauksesi.
a) Natriumin aktiivisuus pienenee neljäsosaan noin 30 tunnissa.
b) Näytteen massa pienenee hajoamisessa 8 mg noin 15 tunnissa.

6-6. Radioaktiivisten aineiden hajotessa pysymättömät ytimet hajoavat lähettäen ionisoivaa säteilyä.
a) Mitkä ovat tämän säteilyn lajit?
b) Erään jodinäytteen aktiivisuus riippuu ajasta oheisen kuvion mukaisesti. Konstruoi kuvaajaan aikaskaala, kun tiedetään, että tämän jodi-isotoopin puoliintumisaika on 25 min. Määritä sen jälkeen kuvaajasta aika, jonka kuluessa näytteen aktiivisuus on pienentynyt kymmenenteen osaan alkuperäisestä. [K2001, 2]



6-7. Osoita, että aktiivisuus voidaan esittää muodossa $A = \lambda \frac{m}{M} N_\mathrm{A}$.

6-8. Toriumisotooppi $^{232}_{90}\mathrm{Th}$ syntyy alfahajoamisen seurauksena uraanista.
a) Kirjoita reaktioyhtälö.
b) Laske toriumnäytteen aktiivisuus, kun toriumia on 25,0 g.

6-9. Jodin isotooppia $^{131}_{53}\mathrm{I}$ sisältävän näytteen aktiivisuus on valmistushetkellä 110 kBq. Kuinka suuri on näytteen aktiivisuus kuukauden (30 d) kuluttua?

6-10. Säteilymittari osoittaa $^{210}_{84}\mathrm{Po}$-näytteen lähettävän keskimäärin 1 600 α-hiukkasta minuutissa. $^{210}_{84}\mathrm{Po}$-nuklidin puoliintumisaika on 138,4 d. Kuinka monta α-hiukkasta minuutissa mittari näyttää samalla koejärjestelyllä 420 vuorokauden kuluttua?

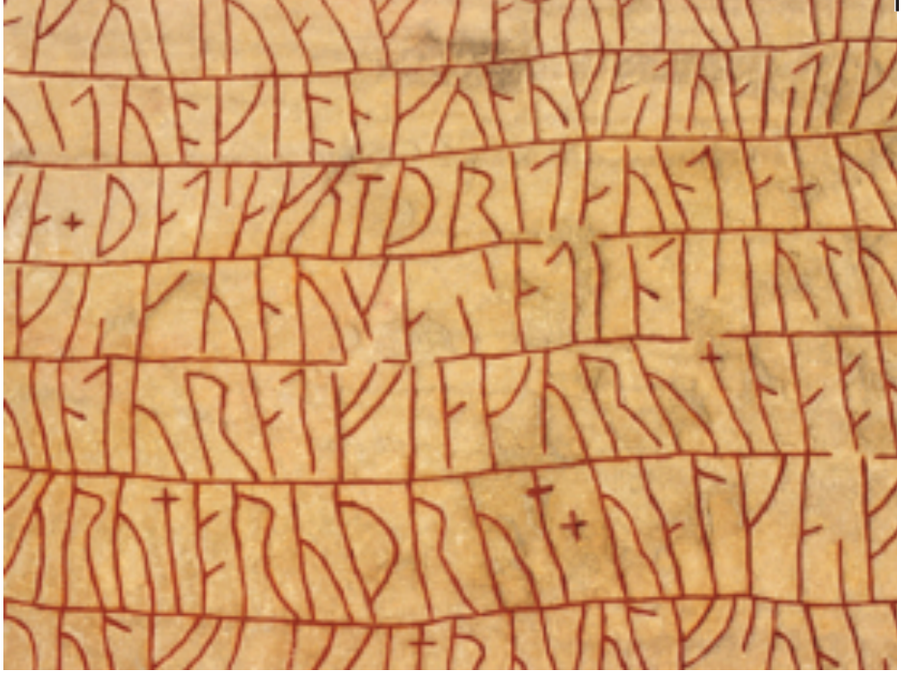
6-11. a) Uraani-238:n hajoamissarjaan kuuluva radon-222 hajoaa esimerkiksi seuraavan ketjun mukaan: radon-222:n alfahajoamisessa syntyvä tytärydin hajoaa α-emissiolla, jonka jälkeen tapahtuu kaksi β^--hajoamista. Kirjoita tämän ketjun hajoamisreaktiot. Mikä on uraanin hajoamissarjan viimeinen ydin?
b) Porakaivosta otetaan vesinäyte, jonka radonin aktiivisuudeksi mitataan 4 700 Bq litraa kohden 28 tunnin kuluttua näytteen ottamisesta. Kuinka suuri radonin aktiivisuus oli näytteenottamishetkellä?

6-12. Erään radioaktiivisen näytteen aktiivisuus vähenee 45 vuorokaudessa arvosta 120 Bq arvoon 110 Bq. Mikä on näytteen aineen puoliintumisaika?

6-13. Maidon aktiivisuusmittauksissa ydinvoimalaonnettomuuden jälkeen mitattiin jodin isotoopin $^{131}\mathrm{I}$ ($Z = 53$, massa 103,906114 u) aktiivisuudeksi 8,4 kBq/l. Tämän isotoopin puoliintumisaika on 8,02 vuorokautta, ja jokaista ytimen hajoamista kohti vapautuu yksi β^--hiukkanen, jonka keskimääräinen energia on 0,19 MeV.
a) Kuinka kauan maitoa pitäisi säilyttää, jotta sen aktiivisuuspitoisuus alittaisi hylkäysrajan 2,0 kBq/l?
b) Kaiken ihmisen kehoon joutuneen jodin voidaan olettaa kertyvän kilpirauhaseen. Laske yhdessä puoliintumisajassa kilpirauhaseen absorboituvan energian määrä yhdestä lasillisesta (2,0 dl) maitoa, jos lisäksi oletetaan, että kaikki β-säteilyn energia jää kilpirauhaseen.
c) Arvioi, miten oikeutettu on oletus, että kaikki β-säteilyn energia absorboituu kilpirauhaseen (kilpirauhasen massa on 10–40 g). [TKK 2000]

6-14. Sädehoitoa varten on ydinreaktorissa tuotettu luonnon jodista $^{127}\mathrm{I}$ neutronisieppausreaktiolla radioaktiivista jodi-isotooppia $^{128}\mathrm{I}$, jonka puoliintumisaika on 25,0 min.
a) Kuinka suuri on näytteen aktiivisuus, kun radioisotooppia $^{128}\mathrm{I}$ on 2,0 ng?
b) Kuinka suuri on näytteen aktiivisuus ajan 2 h 5 min kuluttua a-kohdan tilanteesta?
c) $^{128}\mathrm{I}$ voi hajota kolmella eri tavalla: β^-, β^+ ja EC (elektronisieppaus). Kirjoita vastaavat reaktioyhtälöt. [K2006, 9]

6-15. Pullo radioaktiivista $^{131}\mathrm{I}$-isotooppiliuosta ($T_{1/2} = 8{,}02$ d) saapuu joka viikko tiistaisin aamupäivällä sairaalaan. Saapuessaan jodipullo sisältää 40 ml jodiliuosta ja sen aktiivisuus on 160 MBq. Mikä oli jodiliuoksen aktiivisuus, kun se lähti ulkomaiselta tuottajalta ja kuljetus kesti 4 päivää? Sairaalan laboratoriolääkäri tekee kilpirauhastutkimuksen seuraavana maanantaina aamupäivällä. Pullo sisältää silloin vielä 25 ml jodiliuosta. Jotta tutkimus onnistuisi, on potilaalle annettava 8 MBq:n jodiannos. Kuinka paljon jodiliuosta tutkimukseen tarvitaan? [Lääk. 1997]



Poltettuun saveen jääneen hiilen avulla voidaan määrittää vanhojen ruukkujen ikä. Sen sijaan kiveen hakatun riimukirjoituksen ikää ei voida arvioida radiohiilimenetelmällä.

6.2 Radiohiiliajoitus

Radioaktiivisia aineita voidaan tietyin edellytyksin käyttää arkeologisessa iänmäärityksessä. Yksi tunnetuimmista iänmääritysmenetelmistä on hiilen radioaktiivisen isotoopin, radiohiilen $^{14}_{6}\mathrm{C}$, käyttö.

Maan ilmakehään ja Maahankin saapuu avaruudesta säteilyä, jota kutsutaan kosmiseksi säteilyksi. Se koostuu sekä sähkömagneettisesta säteilystä että hiukkassäteilystä, kuten neutroneista. Kun neutroni törmää ilmakehässä olevaan typpiytimeen, voi tapahtua ydinreaktio $^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{14}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{1}\mathrm{p}$. Syntyneen hiili-isotoopin $^{14}_{6}\mathrm{C}$ puoliintumisaika on 5 730 a. Saman alkuaineen eri isotoopit ovat kemiallisesti samanlaisia, joten ne kaikki sitoutuvat kemiallisiin yhdisteisiin samalla tavalla. Osa ilman hiilidioksidimolekyyleistä (CO_2) sisältää tätä isotooppia. Radioaktiivisen hiili-isotoopin, radiohiilen $^{14}_{6}\mathrm{C}$, osuus kaikesta ilmakehän hiilestä on noin $1{,}2 \cdot 10^{-10}$ %.

Kasvit saavat hiilen suoraan ilmakehästä ja muut eliöt ravinnon mukana. Kun eliö tai kasvi kuolee ja aineenvaihdunta loppuu, isotoopin $^{14}_{6}\mathrm{C}$ osuus verrattuna isotooppiin $^{12}_{6}\mathrm{C}$ alkaa alentua reaktion $^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$ mukaisesti.

Jos tutkittava kohde, kuten taideteos, fossiili, käsikirjoitus tai muinaislöytö, on joskus sisältänyt elävää organismia, sen iän määrittämiseen voidaan käyttää hiiliajoitusta. Historiallisten ja

esihistoriallisten näytteiden iänmääritys tehdään usein tällä menetelmällä.

Radiohiilen $^{14}_{6}\mathrm{C}$ pitoisuuksiin ilmakehässä eri aikoina ovat vaikuttaneet kosmisen säteilyn määrän vaihtelu, Maan magneettikentän muutokset, fossiilisten polttoaineiden käyttö ja ydinkokeet. Arkeologiassa on erilaisia keinoja tarkentaa $^{14}_{6}\mathrm{C}$-isotooppiin perustuvaa iänmääritystä.

Maakerrostumien avulla radiohiilimenetelmää on voitu tarkentaa 45 000 vuotta taaksepäin. Sitä vanhemmissa näytteissä radiohiiltä on jäljellä niin vähän, että yli 50 000 vuotta vanhojen näytteiden tutkimiseen radiohiilimenetelmä ei sovellu. Se ei toimi hyvin kovin nuorienkaan näytteiden tutkimisessa.

Esimerkki 3

Tammelan Liesjärveltä löydetty ruuhi on ajoitettu kivi- ja pronssikauden rajalle noin vuoteen 1500 eKr.

Järven pohjasta löydettiin osittain hajonnut vene. Veneestä otetun puukappaleen $^{14}_{6}\mathrm{C}$-isotoopin aktiivisuus oli 18 Bq. Kasvavasta puusta otetun samanmassaisen kappaleen radiohiilestä johtuva aktiivisuus on 27 Bq. Radiohiilen puoliintumisaika on 5 730 vuotta. Arvioi, kuinka vanha vene on.

$A = 18\ \mathrm{Bq}, \quad A_0 = 27\ \mathrm{Bq}, \quad T_{1/2} = 5\,730\ \mathrm{a}$

Puukappaleen aktiivisuus hetkellä t on $A = A_0 e^{-\lambda t}$, jossa A_0 on aktiivisuus puun kuolemishetkellä. Jaetaan yhtälö puolittain A_0:lla ja otetaan yhtälöstä logaritmi puolittain:

$$\ln\frac{A}{A_0} = \ln e^{-\lambda t} = -\lambda t \cdot \ln e = -\lambda t.$$

Hajoamisvakio on $\lambda = \dfrac{\ln 2}{T_{1/2}}$, joten veneestä otetun näytteen ikä on

$$t = \frac{\ln\dfrac{A}{A_0}}{-\lambda} = \frac{\ln\dfrac{A}{A_0}}{-\dfrac{\ln 2}{T_{1/2}}} = \frac{\ln\dfrac{18\ \mathrm{Bq}}{27\mathrm{Bq}}}{-\dfrac{\ln 2}{5\,730\ \mathrm{a}}} \approx 3\,400\ \mathrm{a}.$$

Vene on noin 3 400 vuotta vanha.

Tehtäviä

6-16. a) Radiohiiliajoituksella voidaan määrittää melko luotettavasti kappaleen ikä vain noin 10 000–50 000 vuoden päähän. Miksi vanhojen näytteiden iänmäärityksen epätarkkuus lisääntyy voimakkaasti?
b) Miksi iältään yli 50 000 vuotta vanhojen näytteiden tutkimisessa on käytettävä apuna muita radioaktiivisia aineita?
c) Millaisia näytteitä radiohiilimittauksilla voidaan tutkia?
d) Millaisten näytteiden iänmääritykseen käytetään tritiumia $\left({}^{3}_{1}\mathrm{H}\right)$?

6-17. a) Radiohiilitutkimuksessa aktiivisuutta mittaava laskuri sijoitetaan usein paksun metalli- tai lyijysuojan sisään. Miksi näin menetellään?
b) On arvioitu, että ilmakehässä tehtyjen ydinkokeiden vuoksi radiohiiliajoitusta ei voitaisi tulevaisuudessa käyttää luotettavasti nykyesineiden tutkimukseen. Mistä tämä johtuu?
c) Selvitä, mitä muita radioaktiivisuuteen perustuvia iänmäärityskeinoja on kuin radiohiiliajoitus.

6-18. Suosta löydetyn ison puukappaleen radiohiilestä johtuva aktiivisuus on 400 Bq. Tuoreen puun vastaava aktiivisuus on 800 Bq. Näytteissä on yhtä paljon hiiltä. Arvioi suosta löydetyn puunrungon ikä.

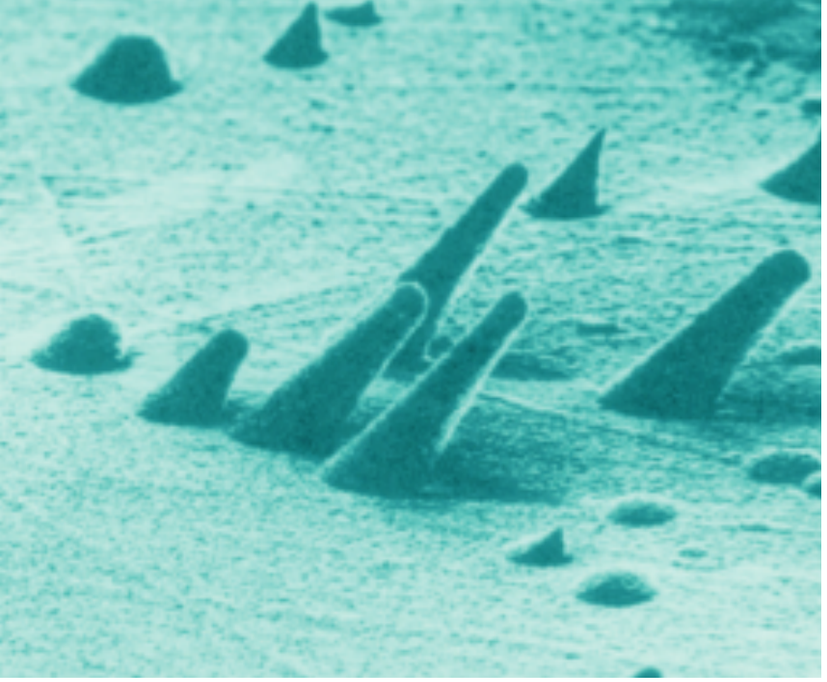
6-19. Minkä ajan kuluttua on jäljellä 25 % ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$-hiili-isotoopin alkuperäisestä määrästä?

6-20. Arkeologisten eloperäisten näytteiden iän määrittämisessä käytetään yleisesti ns. hiili-14-menetelmää, jossa ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$ on β^--aktiivinen.
a) Kirjoita ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$-isotoopin hajoamisreaktio.
b) Arkeologisesta näytteestä, joka sisältää 440,0 mg hiiltä, rekisteröidään 155 hajoamisreaktiota tunnissa. Määritä näytteen ikä, jos oletetaan, että ilmakehän hiilen aktiivisuus näytteen syntyhetkellä on 0,255 Bq hiiligrammaa kohti. [TKK 2005]

6-21. Arkeologisesta löydöstä otetun 1,0 g:n massaisen hiilinäytteen aktiivisuudeksi mitataan (7 500 $\pm$ 90) 1/d (hajoamista/vrk). Laske näytteen ikä virherajoineen, kun tuoreesta puusta saadun 1,0 g:n hiilinäytteen keskimääräinen aktiivisuus on 20 200 1/d. Radiohiilen puoliintumisaika on 5 730 a.

6-22. Viinikauppias väittää erästä myymäänsä viiniä ainakin 15 vuotta vanhaksi. Tutkittaessa viinin ikää havaittiin 0,70 litran viinimäärän tritiumaktiivisuudeksi 3,77 Bq. Juuri valmistetussa viinissä tritiumatomien lukumäärän suhde vetyatomien määrään on 10^{-16}. Tämän suhteen oletetaan pysyneen uudessa viinissä vakiona ainakin neljänkymmenen vuoden ajan. Arvioi viinin ikä vuosina olettamalla koko näyte vedeksi. Tritiumin puoliintumisaika on 12,3 vuotta. [TKK 1996]

6-23. Nykyisin radiohiiliajoitukseen käytetään useimmiten hiukkaskiihdytintä, jolle määritetään suoraan isotooppien ${}^{14}\mathrm{C}$ ja ${}^{12}\mathrm{C}$ atomien lukumääräsuhde (isotooppisuhde) tutkittavassa näytteessä. Vuonna 1991 Tirolista löydetyn muumion, ”Jäämies Ötzin”, radiohiiliajoitus antoi isotooppisuhteeksi $6{,}7 \cdot 10^{-13}$. Mikä olisi muumion ikä tämän tiedon perusteella, kun vastaava isotooppisuhde esimerkiksi elävässä puussa on $1{,}2 \cdot 10^{-12}$? [S2007, 9 osa]



800-kertainen suurennos kosmiselle säteilylle altistetusta astronautin testikypärästä.

Kosminen säteily lisää lentokoneen matkustamohenkilökunnan efektiivistä annosta keskimäärin 2 mSv eli 50 % vuodessa.

6.3 Säteilyturvallisuus

Tässä luvussa käsitellään vain ydinsäteilyyn tai muuhun ionisoivaan säteilyyn liittyvää säteilyturvallisuutta. Ionisoivaa säteilyä ei voi havaita aistein, mutta se on haitallista elävälle kudokselle. Ionisoiva säteily aiheuttaa muutoksia soluissa, ja solumuutoksesta voi kehittyä esimerkiksi syöpäkasvain.

Säteilylajien luokittelu

Sähkömagneettinen säteily
radioaallot
mikroaallot
infrapunasäteily
valo
ultraviolettisäteily
röntgensäteily
gammasäteily
Hiukkassäteily
alfasäteily
beetasäteily
neutronisäteily

Ionisoiva säteily on merkitty punaisella.

Kun ionisoiva säteily kohtaa elimistön, ainakin osa säteilystä absorboituu elimistöön. Säteilyn vaikutusta ihmisen elimistöön kuvaa **efektiivinen annos**, joka ilmaisee säteilyn aiheuttaman terveydellisen kokonaishaitan. Efektiivisen annoksen yksikkö on 1 Sv (sievert). Sievert on suuri yksikkö: esimerkiksi Suomessa asuvien keskimääräinen kokonaisannos on noin 3,7 mSv vuodessa. Efektiivisen annoksen suuruuteen vaikuttavat mm. säteilyn kokonaisenergia, säteilylaji, yksittäisten hiukkasten liikeenergiat, gamma- ja röntgensäteilyn aallonpituus sekä säteilylle altistunut kehon osa.

Efektiivistä annosta ei voi suoraan mitata, vaan se lasketaan edellä luetelluista seikoista. Esimerkiksi α-säteily on noin 20 kertaa haitallisempaa kuin γ-säteily. Säteilyn riskit ovat suurimmat sellaisissa elimissä, joissa tapahtuu solujen jakaantumista.

Esimerkiksi punaisessa luuytimessä, rintarauhasissa, keuhkoissa ja mahalaukun seinämissä säteilyn riskit on arvioitu 12-kertaisiksi verrattuna vastaavan säteilyn aiheuttamiin riskeihin aivoissa, ihossa tai luun pinnassa.

Luonnossa esiintyy ihmisen toimista riippumatonta ja myös avaruudesta tulevaa säteilyä. Näitä kutsutaan taustasäteilyksi. Suomen luonnossa esiintyvä säteily aiheutuu pääasiassa U-238- ja Th-232-hajoamissarjojen radioaktiivisista isotoopeista. Suomessa asuvien ihmisten suurin säteilyannos on peräisin sisäilman α-aktiivisesta radonisotoopista $^{222}_{86}\mathrm{Rn}$.

Radon on ongelma tietyillä alueilla erityisesti omakotitalojen sisäilmassa, jos maaperästä vapautuva radon pääsee huonosti eristetyn alapohjan läpi talon sisäilmaan. Hengitysilman radonin aiheuttaman säteilyannoksen osuus on Suomessa yli puolet (noin 2 mSv) väestön vuotuisesta säteilyn kokonaisannoksesta. Radonin haittoja osataan torjua rakennusteknisin keinoin. Vaihtelevia määriä radonia ja muita $^{238}_{92}\mathrm{U}$:n hajoamisketjun radioaktiivisia tuotteita on myös porakaivojen vesissä.

Avaruudesta tulee Maahan esimerkiksi gammasäteilyä, varauksisia hiukkasia ja neutroneita, vaikka ilmakehä suodattaa suurimman osan säteilystä. Radioaktiivisia aineita joutuu ihmisen elimistöön esimerkiksi ruoan ja hengityksen mukana. Kaliumin pitkäikäistä ($T_{1/2} = 1{,}29 \cdot 10^9$ a) radioaktiivista isotooppia $^{40}_{19}\mathrm{K}$ pääsee maaperästä elimistöön ravinnon ja juomaveden mukana. Elimistöön siirtyy myös uraanin isotooppeja ja hajoamisketjun tytärnuklideja, esimerkiksi radiumia.

Ulkoilman säteilymääriä mitataan Suomessa noin 300 paikkakunnalla eri puolilla maata. Jos säteilyltä on suojauduttava nopeasti esimerkiksi ydinvoimalaitoksessa tapahtuneen onnettomuuden takia, annetaan yleinen hälytysmerkki. Tällöin ihmisten on siirryttävä sisätiloihin ja noudatettava radiossa, televisiossa tai internetissä annettavia viranomaisten ohjeita.

Ulkoisen säteilyn annosnopeusmittari.

Testaa, osaatko

Oikeita vastausvaihtoehtoja voi olla yksi tai useampia.

1. Radioaktiivisen aineen aktiivisuus riippuu
a) aineesta
b) aineen määrästä
c) aineen lämpötilasta.

2. Radioaktiivisen aineen hajoamisnopeutta kuvaa
a) hajoamisvakio
b) puoliintumisaika
c) aktiivisuus.

3. Hajoamislaki $A = A_0 e^{-\lambda t}$ ilmaisee
a) näytteiden, joissa on vain yhtä radioaktiivista isotooppia
b) kaikkien radioaktiivisten näytteiden
c) vain pitkäikäisten radioaktiivisten isotooppien
aktiivisuuden.

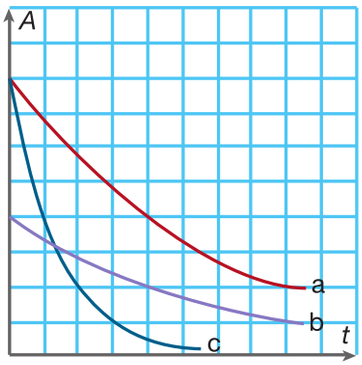
4. Mitkä seuraavista väitteistä pitävät paikkansa?
a) Radioaktiivisissa hajoamissarjoissa massaluku voi muuttua vain neljällä.
b) Beetahajoaminen muuttaa järjestyslukua yhdellä.
c) Kaikki luonnossa esiintyvät radioaktiiviset alkuaineet kuuluvat pitkäikäisten isotooppien hajoamissarjoihin.

5. Jos radioaktiivisen aineen puoliintumisaika on pitkä
a) hajoamisvakio on suuri
b) hajoamisvakio on pieni
c) aktiivisuus pienenee hitaasti.

6. Radioaktiivisen näytteen emoydinten aktiivisuus puoliintuu, kun
a) näytteen massa puolitetaan
b) aikaa kuluu kahden puoliintumisajan verran
c) alkuperäisistä ytimistä puolet ovat hajonneet.

7. Kultaisotoopin $^{199}_{79}\mathrm{Au}$ puoliintumisaika on 3,14 d. Kyseisen kultaisotoopin hajoamisvakio on
a) $0{,}255 \cdot 10^{-6}$ 1/s
b) $2{,}55 \cdot 10^{-6}$ 1/s
c) $255 \cdot 10^{-6}$ 1/s.

8. Kuvaajassa esitetään kolmen radioaktiivisen näytteen aktiivisuus ajan funktiona. Millä näytteellä on pisin puoliintumisaika?



9. Mitkä seuraavista väitteistä ovat totta?
a) Luonnossa esiintyvät alkuaineiden isotoopit ovat aina stabiileja.
b) Useimmat lyhytikäiset radioaktiiviset alkuaineet ovat pitkäikäisten alkuaineiden hajoamistuotteita.
c) Hajoamissarjat päättyvät aina stabiileihin isotooppeihin.

10. Radiohiiliajoitus
a) on arkeologinen menetelmä, jolla voidaan määrittää esimerkiksi kiveen hakatun kirjoituksen ikä
b) perustuu hiili-14-isotoopin pitoisuuden alenemiseen hajoamislain mukaan
c) vaatii tarkan säteilyilmaisimen, koska tutkittavan näytteen aktiivisuus on usein hyvin pieni.

11. Ionisoiva säteily aiheuttaa herkimmin muutoksia
a) aivoissa
b) keuhkoissa
c) elimissä, joissa on uusiutuvaa solukkoa.

Tiivistelmä

- Aktiivisuus kuvaa ytimien hajoamisnopeutta. Keskimääräinen aktiivisuus on hajoamisten lukumäärä aikayksikössä: $A = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = \left|\frac{\Delta N}{\Delta t}\right|$. Radioaktiivisen näytteen hetkellinen aktiivisuus on suoraan verrannollinen hajoavien ytimien määrään N, eli $A = \lambda N$, jossa λ on hajoamisvakio.
- Radioaktiivisen näytteen aktiivisuus hetkellä t on $A = A_0 e^{-\lambda t}$.
- Radioaktiivisten ytimien lukumäärä hetkellä t on $N = N_0 e^{-\lambda t}$.
- Puoliintumisajan kuluessa puolet alussa olleista radioaktiivisista ytimistä ovat hajonneet. Puoliintumisaika on $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$.
- Radiohiiliajoitus on yksi arkeologisten näytteiden iänmääritysmenetelmä.
- Säteilyn vaikutusta ihmisen elimistöön kuvaa efektiivinen annos, joka ilmaisee säteilyn aiheuttaman terveydellisen kokonaishaitan.
- Hengitysilman radonin aiheuttaman säteilyannoksen osuus on Suomessa yli puolet (noin 2 mSv) väestön vuotuisesta säteilyn kokonaisannoksesta.

7 Energiaa ytimestä

Tässä luvussa opit

- ytimen halkeamis- ja yhdistymisreaktion
- ydinenergian tuottamisen
- ydinvoimalan toiminta-periaatteen.

Keskeisiä käsitteitä ovat

- fissio
- fuusio
- ketjureaktio.

Ydinvoimalaitoksissa energiantuotanto perustuu raskaiden ydinten halkeamiseen. Auringon ja muiden tähtien energia on peräisin kevyiden ytimien yhdistymisestä raskaammiksi ytimiksi.

7.1 Ydinreaktiot

Ydinreaktioissa atomien ytimet muuttuvat toisiksi ytimiksi. Ydinreaktiot voivat tapahtua joko itsestään eli **spontaanisti** tai keinotekoisesti. Spontaaneja luonnossa tapahtuvia reaktioita ovat joidenkin raskaiden ytimien, kuten uraani-238-ytimien, halkeamiset eli **fissiot** sekä Auringon ja tähtien sisuksissa tapahtuvat kevyiden ytimien yhdistymisreaktiot eli **fuusiot**. Alkuaine voi muuttua toiseksi alkuaineeksi vain ydinreaktioissa.

Keinotekoisia ydinreaktioita voidaan saada aikaan, kun ytimiä pommitetaan α-hiukkasilla, protoneilla, neutroneilla, γ-kvanteilla, deuteriumin ytimillä (deuteroneilla d) tai raskaammillakin ytimillä. Keinotekoisissa ydinreaktioissa syntyneet ytimet ovat usein radioaktiivisia. Tällaisia isotooppeja kutsutaan **radioisotoopeiksi** ja niiden radioaktiivisuutta keinotekoiseksi radioaktiivisuudeksi.

Ernest Rutherford sai vuonna 1919 aikaan ensimmäisen keinotekoisen ydinreaktion. Hän pommitti α-hiukkasilla typpikaasua. Tämän historiallisen ydinreaktion alku- ja lopputilan välille voidaan kirjoittaa reaktioyhtälö

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{17}_{8}\mathrm{O}.$$

Joskus reaktioyhtälö kirjoitetaan lyhyemmin $^{14}_{7}\mathrm{N}(\alpha, \mathrm{p})^{17}_{8}\mathrm{O}$.

Ydinreaktion massavaje saadaan laskemalla reaktioon osallistuvien lähtö- ja tulosydinten sekä reaktioon osallistuvien hiukkasten massojen erotus. Massavajeesta voidaan laskea ydinreaktiossa vapautuva tai sitoutuva energia eli **reaktioenergia**.

Reaktioenergia
Ydinreaktion reaktioenergia on

$$Q = \Delta m c^2,$$

jossa Δm on lähtö- ja tulosydinten massojen erotus ja c valon nopeus tyhjiössä.

Reaktio on **energiaa vapauttava** eli **eksoerginen**, jos reaktioenergia ja massavaje ovat **positiivisia**. Spontaanit radioaktiiviset hajoamiset ovat aina eksoergisiä. Niissä osa massasta muuttuu reaktiotuotteiden liike-energiaksi ja gammasäteilyn energiaksi.

Reaktio on **energiaa sitova** eli **endoerginen**, jos se vaatii syntyäkseen energiaa. Endoergisen reaktion reaktioenergia ja massavaje ovat **negatiivisia**. Tulosydinten massojen summa on suurempi kuin lähtöydinten massojen summa. Energiaa sitovassa reaktiossa pommittavan ytimen liike-energiaa muuntuu syntyvien ytimien sisäiseksi energiaksi (massaksi). Pienintä mahdollista liike-energiaa, jolla reaktio tapahtuu, sanotaan **kynnysenergiaksi**.

Kun raskaita ytimiä pommitetaan hiukkaskiihdyttimessä, saadaan syntymään myös luonnossa esiintymättömiä alkuaineita, joiden järjestysluku on uraanin järjestyslukua 92 suurempi. Ne kaikki ovat pysymättömiä, ja niitä kutsutaan **transuraaneiksi**.

Esimerkki 1

Laske
a) massavaje b) massavajetta vastaava reaktioenergia Rutherfordin ensimmäisessä keinotekoisessa ydinreaktiossa $^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{17}_{8}\mathrm{O}$. Vapautuuko tässä ydinreaktiossa energiaa? Anna vastaukset viiden merkitsevän numeron tarkkuudella.

$m(^{14}_{7}\mathrm{N}) = 14{,}0030740\ \mathrm{u}$, $m(^{4}_{2}\mathrm{He}) = 4{,}0026033\ \mathrm{u}$,
$m(^{1}_{1}\mathrm{H}) = 1{,}0078250\ \mathrm{u}$, $m(^{17}_{8}\mathrm{O}) = 16{,}999131\ \mathrm{u}$,
$1\ \mathrm{u} = 931{,}49432\ \mathrm{MeV}/c^2$

a) Reaktiossa $^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{17}_{8}\mathrm{O}$ massavaje lasketaan lähtö- ja tulosytimien massojen erotuksena:

$$\begin{aligned}
\Delta m &= [m(^{14}_{7}\mathrm{N}) - 7m(\mathrm{e}) + m(^{4}_{2}\mathrm{He}) - 2m(\mathrm{e})] \\
&\quad - [m(^{1}_{1}\mathrm{H}) - m(\mathrm{e}) + m(^{17}_{8}\mathrm{O}) - 8m(\mathrm{e})] \\
&= [m(^{14}_{7}\mathrm{N}) + m(^{4}_{2}\mathrm{He})] - [m(^{1}_{1}\mathrm{H}) + m(^{17}_{8}\mathrm{O})] \\
&= [14{,}0030740\ \mathrm{u} + 4{,}0026033\ \mathrm{u}] \\
&\quad - [1{,}0078250\ \mathrm{u} + 16{,}999131\ \mathrm{u}] \\
&= -0{,}0012787\ \mathrm{u}.
\end{aligned}$$

Massavaje on $-0{,}0012787$ u.

Huomaa, että ydinreaktion lähtö- ja tulosydinten massojen erotus on yhtä suuri kuin atomimassojen erotus.

b) Massavajetta vastaava reaktioenergia on

$$\begin{aligned}
Q &= \Delta m c^2 = -0{,}0012787\ \mathrm{u} \cdot c^2 \\
&= -0{,}0012787 \cdot 931{,}49432\ \mathrm{MeV}/c^2 \cdot c^2 \approx -1{,}1911\ \mathrm{MeV}.
\end{aligned}$$

Koska reaktioenergia on negatiivinen, reaktio sitoo energiaa (endoerginen reaktio).

Energiaa ei vapaudu vaan sitoutuu 1,1911 MeV.

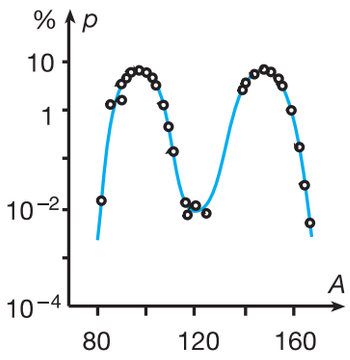
Ydinvoimalaitoksen jäähdytystorneista vapautuu vesihöyryä. Suomessa ydinvoimaloiden jäähdytys tapahtuu meriveden avulla, ei jäähdytystorneissa.

Atomipommissa eli fissiopommissa tapahtuu hallitsematon ketjureaktio. Lämpötila voi kohota jopa 10 miljardiin asteeseen.

7.2 Fissio ja fuusio

Ytimessä sidosenergia nukleonia kohti eli sidososuus on suurimmillaan keskiraskailla ytimillä (ks. s. 93). Jos ytimet muuttuvat toisiksi ytimiksi siten, että **sidososuus kasvaa**, **vapautuu** ytimen **sidosenergiaa**. Jos ydinreaktiossa ydin muuttuu toiseksi ytimeksi, jonka sidososuus on suurempi kuin sen oma sidososuus, osa sen energiasta vapautuu. Ydinenergiaa vapautuu **fissioissa**, kun raskaat ytimet halkeavat keskiraskaiksi, ja **fuusioissa** eli kevyiden ytimien liittymisreaktioissa. Ydinvoimalaitosten energiantuotanto perustuu raskaiden ytimien fissioihin.

$^{235}_{92}$U-ytimen eri halkeamistulosten todennäköisyys on esitetty prosentteina massaluvun funktiona. Huomaa logaritminen pystyakseli.



Fissio

Ensimmäinen neutronipommituksella aikaan saatu fissioreaktio havaittiin vuonna 1938, kun uraaniytimiä pommitettiin neutroneilla. Pommituksen jälkeen huomattiin, että uraaninäytteeseen oli syntynyt useita keskiraskaita alkuaineita. Varauksettomat neutronit pääsevät helposti vuorovaikutukseen ytimen kanssa, jolloin ydin voi siepata neutronin ja sieppaajanuklidi muuttuu saman alkuaineen eri isotoopiksi: ${}^{A}_{Z}\mathrm{X} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{A+1}_{Z}\mathrm{X}$. Syntynyt ydin voi hajota radioaktiivisesti esimerkiksi lähettämällä β^--hiukkasen.

Uusi ydin voi jäädä myös värähtelevään tilaan, mikä voi johtaa ytimen halkeamiseen kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi.

Fissio
Fissiossa raskaat ytimet halkeavat keskiraskaiksi ytimiksi.

Hitaan neutronin aiheuttama $^{235}_{92}\mathrm{U}$:n fissio on paljon todennäköisempi kuin nopean neutronin aiheuttama fissio. Sellaisia neutroneja, joiden nopeus vastaa lämpöliikkeessä olevien hiukkasten nopeutta, kutsutaan **hitaiksi** eli **termisiksi neutroneiksi**. Nopeat neutronit eivät yleensä aiheuta uraaniytimen halkeamista. On myös ytimiä, jotka eivät halkea hitaiden neutronien pommituksessa, vaan halkeamiseen tarvitaan nopeiden neutronien suuri liike-energia.

Uraani-235:n halkeamisreaktioita ovat esimerkiksi

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow [{}^{236}_{92}\mathrm{U}] \rightarrow {}^{141}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{92}_{36}\mathrm{Kr} + 3\,{}^{1}_{0}\mathrm{n} \text{ ja}$$

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow [{}^{236}_{92}\mathrm{U}] \rightarrow {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}.$$

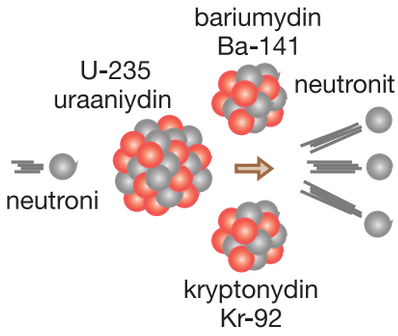
Kun terminen neutroni törmää $^{235}_{92}\mathrm{U}$-ytimeen, uraaniydin sieppaa hitaan neutronin. Tällöin syntyy lyhytikäinen **väliydin** $^{236}_{92}\mathrm{U}$ ja massavajetta vastaava reaktioenergia ylittää ytimen halkeamiseen tarvittavan energian. Halkeamiseen ei tarvita neutronin liike-energiaa. Siksi hitaatkin neutronit aiheuttavat halkeamisen. Huomaa, että väliydin merkitään reaktioyhtälössä hakasulkeisiin.

Ytimen $^{235}_{92}\mathrm{U}$ haljetessa massavaje on noin 0,22 u, jota vastaava energia on noin 200 MeV. Massavaje on alle 0,1 % reaktioon osallistuvien hiukkasten massasta. Tästä huolimatta vapautuva energia on suuruusluokaltaan miljoonakertainen verrattuna kemiallisissa reaktioissa vapautuvaan energiaan.

$^{235}_{92}\mathrm{U}$:n fissiossa vapautuvan energian (n. 200 MeV) jakautuminen eri energiamuotoihin

Energiamuoto	Energia/MeV
halkeamistuotteiden liike-energia	167
neutronien liike-energia	5
halkeamishetkellä vapautuvan gammasäteilyn energia	7
fission tulosytimen gammasäteilyn energia	5
fission tulosytimen β^--säteilyn energia	5
β^--säteilyn neutriinojen energia	11

Esimerkki 2



Laske uraanin $^{235}_{92}\mathrm{U}$ halkeamisreaktiossa

$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow [{}^{236}_{92}\mathrm{U}] \rightarrow {}^{141}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{92}_{36}\mathrm{Kr} + 3\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$ vapautuva energia. Anna vastaus neljän merkitsevän numeron tarkkuudella.

$m(^{235}_{92}\mathrm{U}) = 235{,}043925\ \mathrm{u}, \quad m(^{141}_{56}\mathrm{Ba}) = 140{,}914410\ \mathrm{u},$
$m(^{92}_{36}\mathrm{Kr}) = 91{,}926111\ \mathrm{u}, \quad m(^{1}_{0}\mathrm{n}) = 1{,}0086650\ \mathrm{u},$
$1\ \mathrm{u} = 931{,}49432\ \mathrm{MeV/c^2}$

Fissiossa ytimien massavaje on

$$\begin{aligned}\Delta m &= m(^{235}_{92}\mathrm{U}) - 92 \cdot m(^{0}_{-1}\mathrm{e}) + m(^{1}_{0}\mathrm{n}) \\ &\quad - [m(^{141}_{56}\mathrm{Ba}) - 56 \cdot m(^{0}_{-1}\mathrm{e}) \\ &\quad + m(^{92}_{36}\mathrm{Kr}) - 36 \cdot m(^{0}_{-1}\mathrm{e}) + 3m(^{1}_{0}\mathrm{n})] \\ &= m(^{235}_{92}\mathrm{U}) - m(^{141}_{56}\mathrm{Ba}) - m(^{92}_{36}\mathrm{Kr}) - 2 \cdot m(^{1}_{0}\mathrm{n}) \\ &= 235{,}043925\ \mathrm{u} - 140{,}914410\ \mathrm{u} - 91{,}926111\ \mathrm{u} - 2 \cdot 1{,}0086650\ \mathrm{u} \\ &= 0{,}186074\ \mathrm{u}.\end{aligned}$$

Massavajetta vastaava reaktioenergia on

$$\begin{aligned}Q &= \Delta m c^2 = 0{,}186074\ \mathrm{u} \cdot c^2 \\ &= 0{,}186074 \cdot 931{,}49432\ \mathrm{MeV/c^2} \cdot \mathrm{c^2} \approx 173{,}3\ \mathrm{MeV}.\end{aligned}$$

Reaktiossa vapautuva energia on 173,3 MeV.

Fuusio

Fuusiossa on kyse kahden kevyen ytimen yhteenliittymisestä. Ytimien sähköisen hylkimisvoiman kantama on paljon pidempi kuin ydinvoiman kantama. Siksi ytimille täytyy antaa suuri liike-energia esimerkiksi hiukkaskiihdyttimillä, jotta ytimet voivat törmätessään päästä vahvan vuorovaikutuksen kantaman etäisyydelle ja liittyä yhteen.

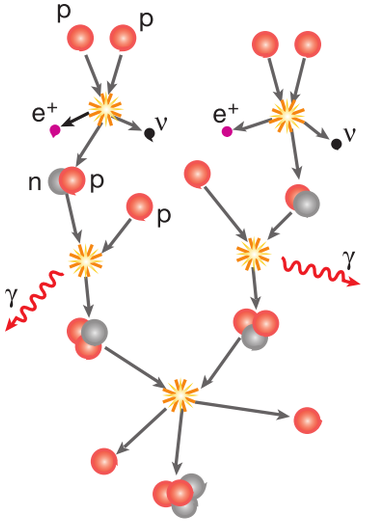
Ensimmäinen fuusiopommi (vetypommi) räjäytettiin vuonna 1952.

Fuusio
Fuusiossa kaksi kevyttä ydintä liittyy yhdeksi ytimeksi.

Coulombin sähköinen hylkimisvoima, ns. **Coulombin valli**, on sitä heikompi, mitä kevyempi ydin on. Se on siis heikoin vetyytimillä eli protoneilla. Vahva vuorovaikutus ei pysty pitämään yhdessä pelkästään kahta protonia, vaan mukaan tarvitaan neutroneja. Siksi helpoimmin fuusioituvia ytimiä ovat vedyn raskaat isotoopit **deuterium** ja **tritium**, joiden välinen ydinreaktio on $^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$.

Energiaa tuottavassa **fuusioreaktorissa** ytimistä ja vapaista elektroneista koostuvan **plasman** lämpötilan pitäisi olla noin 10^8 K, jotta ytimillä olisi fuusion aikaansaamiseksi riittävän suuri lämpöliikkeen liike-energia. Lisäksi plasman tiheyden pitäisi olla suuri, jotta fuusioitumisia tapahtuisi energian tuottamisen kannalta riittävästi. Plasman pitäisi myös pysyä irti reaktorin seinämistä, vaikka positiivisesti varautuneet ytimet hylkivät toisiaan. Nykytekniikalla plasmaa ei pystytä hallitsemaan näin korkeissa lämpötiloissa niin, että fuusio tuottaisi taloudellisesti kannattavaa energiaa.

Energiantuotannossa toimivan fuusioreaktorin etuja olisivat suuri energiantuotto, polttoaineen riittävyys (luonnon veden deuterium) ja edullisuus sekä se, että radioaktiivista polttoainejätettä ei synny.



Protoniketju tähdissä.

Auringon ja muiden tähtien energia on peräisin niiden sisuksissa tapahtuvista fuusioista. Auringon energiantuotossa tärkein on ns. protoniketju:

$$^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H} + \mathrm{e}^{+} + \nu,$$

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + \gamma \text{ ja}$$

$$^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{3}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}.$$

Tämän ketjun ensimmäisen vaiheen tapahtumistodennäköisyys on hyvin pieni. Silti Auringossa muuttuu vetyä heliumiksi 600 miljoonaa tonnia joka sekunti. Tästä massasta noin 4 miljoonaa tonnia muuttuu energiaksi. Vedyn väheneminen on kuitenkin niin hidasta, että sitä riittää Auringon pitkän elinkaaren ajaksi, noin kymmeneksi miljardiksi vuodeksi.

Esimerkki 3

Laske
a) massavaje deuteriumin ja tritiumin fuusioreaktiossa
$^2_1\mathrm{H} + {}^3_1\mathrm{H} \rightarrow {}^4_2\mathrm{He} + {}^1_0\mathrm{n}$
b) massavajetta vastaava energia.
Vapautuuko tässä fuusioreaktiossa energiaa? Anna vastaukset neljän merkitsevän numeron tarkkuudella.

$m({}^2_1\mathrm{H}) = 2{,}0141018\ \mathrm{u}$, $m({}^3_1\mathrm{H}) = 3{,}0160493\ \mathrm{u}$,
$m({}^4_2\mathrm{He}) = 4{,}0026033\ \mathrm{u}$, $m({}^1_0\mathrm{n}) = 1{,}0086650\ \mathrm{u}$,
$1\ \mathrm{u} = 931{,}49432\ \mathrm{MeV}/c^2$

a) Fuusioreaktiossa $^2_1\mathrm{H} + {}^3_1\mathrm{H} \rightarrow {}^4_2\mathrm{He} + {}^1_0\mathrm{n}$ lähtö- ja tulosytimien kokonaismassojen erotus on

$$\begin{aligned}\Delta m &= [m({}^2_1\mathrm{H}) - m({}^0_{-1}\mathrm{e}) + m({}^3_1\mathrm{H}) - m({}^0_{-1}\mathrm{e})] \\ &\quad - [m({}^4_2\mathrm{He}) - 2m({}^0_{-1}\mathrm{e}) + m({}^1_0\mathrm{n})] \\ &= m({}^2_1\mathrm{H}) + m({}^3_1\mathrm{H}) - m({}^4_2\mathrm{He}) - m({}^1_0\mathrm{n}) \\ &= 2{,}0141018\ \mathrm{u} + 3{,}0160493\ \mathrm{u} - 4{,}0026033\ \mathrm{u} - 1{,}0086650\ \mathrm{u} \\ &= 0{,}0188828\ \mathrm{u} \approx 0{,}01888\ \mathrm{u}.\end{aligned}$$

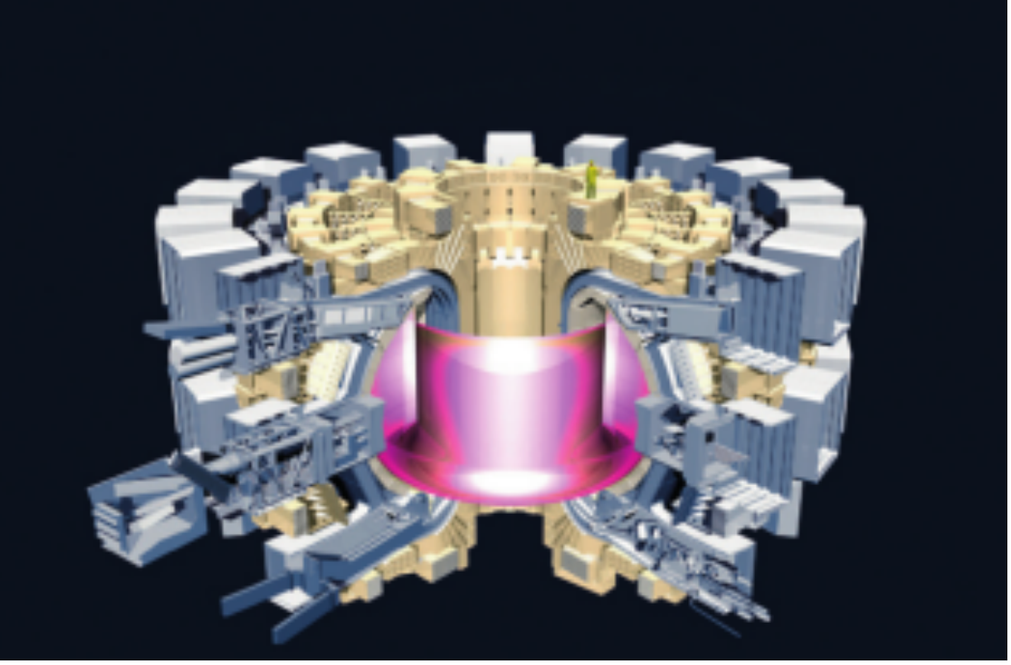
Massavaje on 0,01888 u.

b) Massavajetta vastaava reaktioenergia on

$$\begin{aligned}Q &= \Delta m c^2 = 0{,}0188828\ \mathrm{u} \cdot c^2 \\ &= 0{,}0188828 \cdot 931{,}49432\ \mathrm{MeV}/c^2 \cdot c^2 \approx 17{,}59\ \mathrm{MeV}.\end{aligned}$$

Koska reaktioenergia on positiivinen, osa lähtöhiukkasten massasta muuttuu energiaksi eli reaktiossa vapautuu energiaa (eksoerginen reaktio).

Energiaa vapautuu 17,59 MeV.



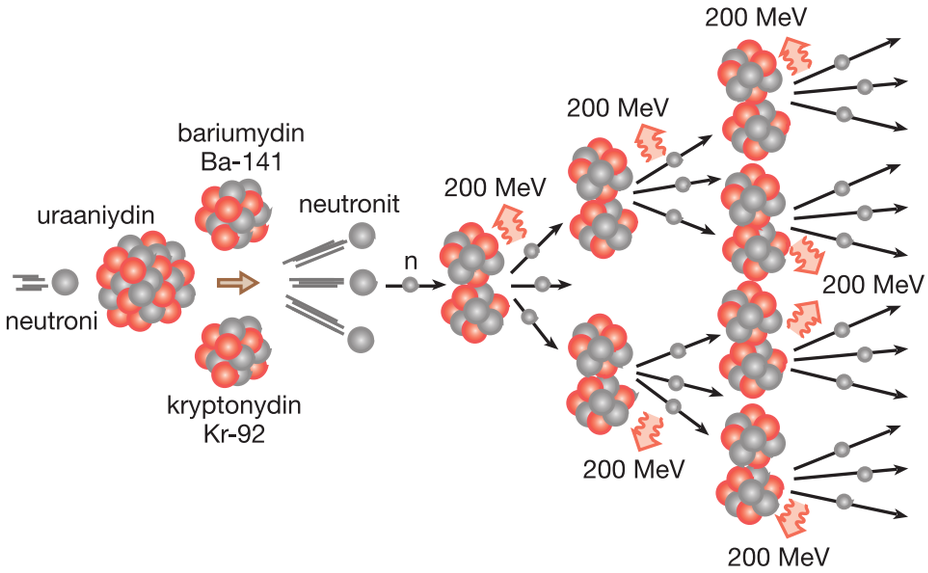
Ranskan Cadaracheen rakennetaan maailman suurin fuusioreaktori. ITER on kansainvälinen hanke, jonka tarkoituksena on osoittaa fuusioenergian kaupallinen tuotanto mahdolliseksi. Mukana on myös suomalaisia yrityksiä.

4,5 kg $^{235}_{92}$U-isotooppia.

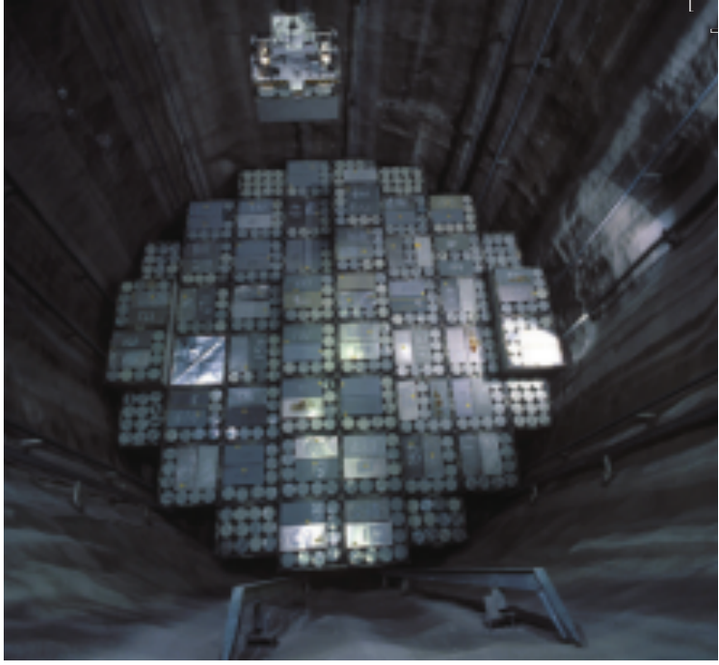
7.3 Ydinenergia

Fissiovoimalaitos

Ydinvoimalaitokset tuottavat energiaa, kuten muutkin lämpövoimalaitokset (ks. Fysiikka 2 -kirjan s. 142). Ydinreaktorin tuottama energia on peräisin uraani-235:n fissioista. Reaktorissa uraaniytimien halkeaminen perustuu **kontrolloituina ketjureaktioina** tapahtuviin fissioihin. Raskaissa ytimissä neutronien suhteellinen osuus protonien määrään verrattuna on suurempi kuin keskiraskaissa ytimissä, joten kunkin ytimen fissiossa vapautuu yleensä kaksi tai kolme neutronia. Ketjureaktion synty vaatii, että $^{235}_{92}$U-ytimiä on riittävä määrä eli uraanimäärä ylittää ns. **kriittisen koon**. Tällöin keskimäärin ainakin yksi ytimen halkeamisessa syntyneistä neutroneista osuu toiseen ytimeen ja aiheuttaa sen halkeamisen.



Yksi uraanipelletti sisältää saman verran energiaa kuin 800 kg hiiltä.

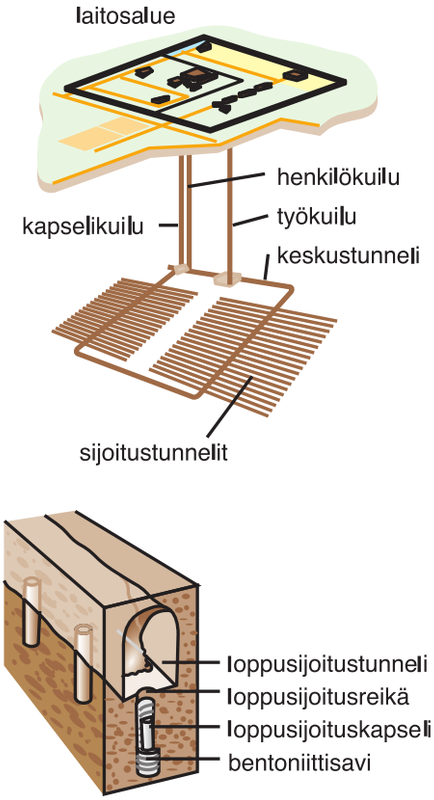


Voimalaitosjätteen loppusijoitustila.

Uraaniytimen halkeamisessa vapautuneilla neutroneilla on liian suuri nopeus, jotta ne voisivat aiheuttaa muiden $^{235}_{92}\mathrm{U}$-ytimien halkeamisreaktion. Neutronit hidastetaan termisiksi neutroneiksi. Hidastamista varten reaktorissa on **hidastinaineena** kevyistä ytimistä koostuvia aineita, yleensä vettä. Vesi toimii samalla säteilysuojana ja siirtää energiaa seuraavaan vaiheeseen energiantuotantoprosessissa.

Luonnon uraanista suurin osa on isotooppia $^{238}_{92}\mathrm{U}$. $^{235}_{92}\mathrm{U}$:n osuus on vain 0,7 %, mikä ei riitä energiantuotannon vaatiman ketjureaktion käynnistämiseen reaktorissa. Reaktorin polttoaineen uraani-235-pitoisuutta kohotetaan eli **rikastetaan** ensin noin 3–4 prosenttiin. Reaktorissa käytettävä uraani on puristettu pieniksi tableteiksi, jotka on sijoitettu esimerkiksi 4 m pitkiin putkiin. Putket on yhdistetty 60–100 kappaleen nipuiksi, jotka ovat reaktorissa 3–5 vuotta.

Ydinreaktorissa fissioiden määrää ja samalla reaktorin lämpötilaa ja tehoa säädellään **neutroneita absorboivilla säätösauvoilla**, jotka ovat osittain reaktorin sisällä ja osittain ulkopuolella. Reaktorin käytön aikana säätösauvoja voidaan siirtää reaktoriin tai reaktorista pois tarpeen mukaan. Mitä enemmän sauvat ovat reaktorin sisällä lomittain polttoainesauvojen kanssa, sitä vähemmän on vapaita neutroneita ja fissioita ja sitä alhaisempia ovat reaktorin lämpötila ja teho.



Ydinpolttoaineen loppusijoitus-laitos ja -luolasto.

Kun ydinvoimala poistetaan käytöstä, noin 95 % käytetystä polttoaineesta on yhä uraani-238:aa ja 1 % uraani-235:tä. Noin 3 % uraanista on hajonnut kevyemmiksi fissiotuotteiksi, esimerkiksi jodiksi, cesiumiksi ja teknetiumiksi. 1 % uraanista on muuttunut uraania raskaammiksi transuraaneiksi, joista merkittävin on plutonium-239. Plutoniumin isotooppia Pu-239 syntyy reaktorissa uraani-238:sta neutronipommituksen vaikutuksesta. Pu-239 on fissioituva, joten se soveltuu reaktorin polttoaineeksi. Suurin osa reaktorissa syntyvästä Pu-239:stä muuttuu neutronisäteilyssä raskaammiksi plutoniumin isotoopeiksi.

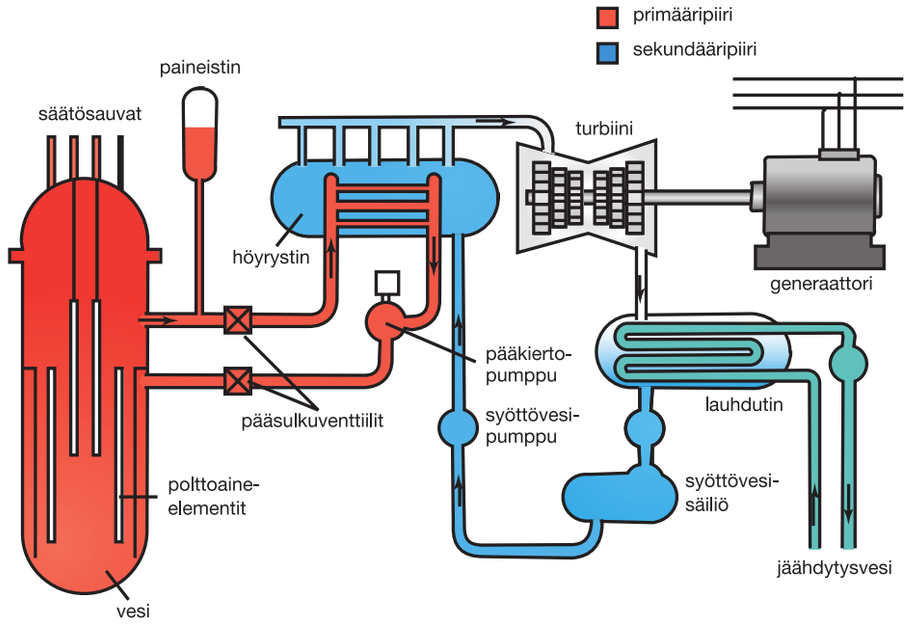
Reaktorista poistettu käytetty ydinpolttoaine on **korkea-aktiivista ydinjätettä**, joka sisältää monia alkuaineita ja niiden eri isotooppeja. Suurin aktiivisuus aiheutuu isotoopeista Pu-241 (puoliintumisaika 14,4 a), Cs-137 (30,2 a) ja Sr-90 (29 a).

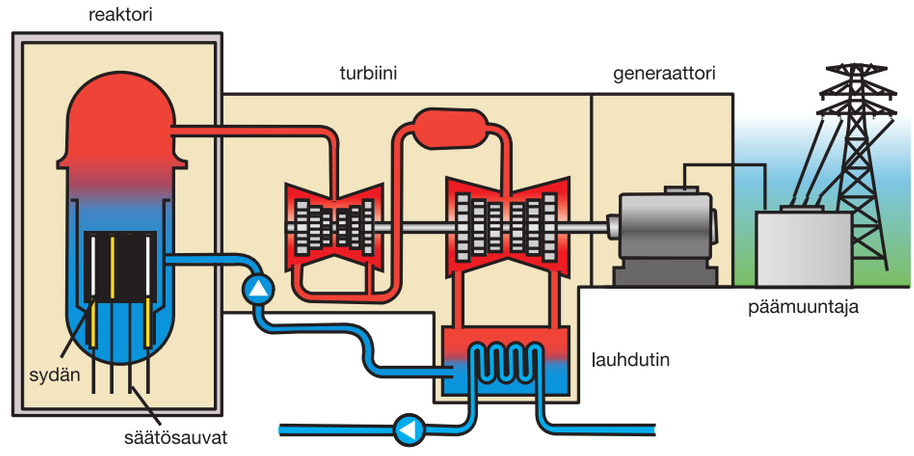
Ennen ydinjätteen **loppusijoitusta** käytettyä polttoainetta säilytetään vesialtaissa 40–60 vuotta. Säilytyksen aikana energian tuotto vähenee. Samalla aktiivisuus ja lämpötila alenevat niin, että jätettä on helpompi käsitellä. Loppusijoitusta varten polttoainesauvaniput siirretään aikanaan **kapselointilaitokseen**, jossa ydinjäte pakataan **loppusijoituskapseleihin**. Jätettä käsitellään kauko-ohjattavilla laitteilla. Suomi on koko maailmassa edelläkävijä ydinjätteiden loppusijoituksen suunnittelussa ja toteutuksessa.

Ydinvoimalaitostyypit

Loviisan ydinvoimalaitoksen kaksi reaktoria ovat **painevesireaktoreita**. Niiden nettotehot ovat noin 480 MW. Reaktiosydämen jäähdytysaineena ja neutronien hidastimena käytettävän veden eli primääripiirin veden paine pidetään niin korkeana, ettei vesi noin 300 °C:n lämpötilastaan huolimatta kiehu kulkiessaan reaktiosydämen läpi. Primääripiirin vesi kuumenee hajoamisreaktioissa syntyvien tuotteiden liike-energian vuoksi.

Kuuma vesi luovuttaa energiansa erillisessä höyrystimessä sekundääripiirin vedelle. Näissä putkistoissa virtaavat vedet eivät pääse sekoittumaan. Toisiopiiriin muodostuva höyry pyörittää turbiineja, jotka pyörittävät generaattoreita. Sekundääripiirin lauhdutin jäähdytetään merivedellä.





Painevesireaktorin ja kiehutusvesireaktorin toimintakaavio.

Kiehutusvesireaktorissa (*Boiling Water Reactor,* BWR) sydämen jäähdytysaineena käytettävä vesi kiehuu ja syntyvä höyry johdetaan pyörittämään turbiinia. Olkiluodon ydinvoimalaitoksen kaksi ensimmäistä reaktoria (v. 2009 reaktorien sähköteho yhteensä n. 1 700 MW) ovat kiehutusvesireaktoreita.

Olkiluotoon valmistuu kolmas reaktori. Se on valmistuessaan teholtaan maailman suurin. Reaktorin lämpöteho on 4 300 MW ja sähköteho 1 600 MW. Olkiluodon uusi reaktori on uuden tyyppinen EPR (*European Pressurized Reactor*) eli painevesireaktori. Suunnitelman mukaan sen käyttöikä on 60 vuotta 95 %:n käyttöasteella.

Hyötöreaktori on saanut nimensä siitä, että se tuottaa halkeamiskelpoista polttoainetta enemmän kuin itse kuluttaa. Hyötöreaktorissa nopeat neutronit muuttavat luonnonuraania $^{238}_{92}\mathrm{U}$ ydinreaktioiden avulla neptuniumiksi $^{239}_{93}\mathrm{Np}$, joka muuttuu edelleen halkeamiskelpoiseksi plutoniumiksi $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$. Toimintavarma hyötöreaktori olisi yksi helpotus maailmaa uhkaavaan energiapulaan, joten sitä kehitetään edelleen.

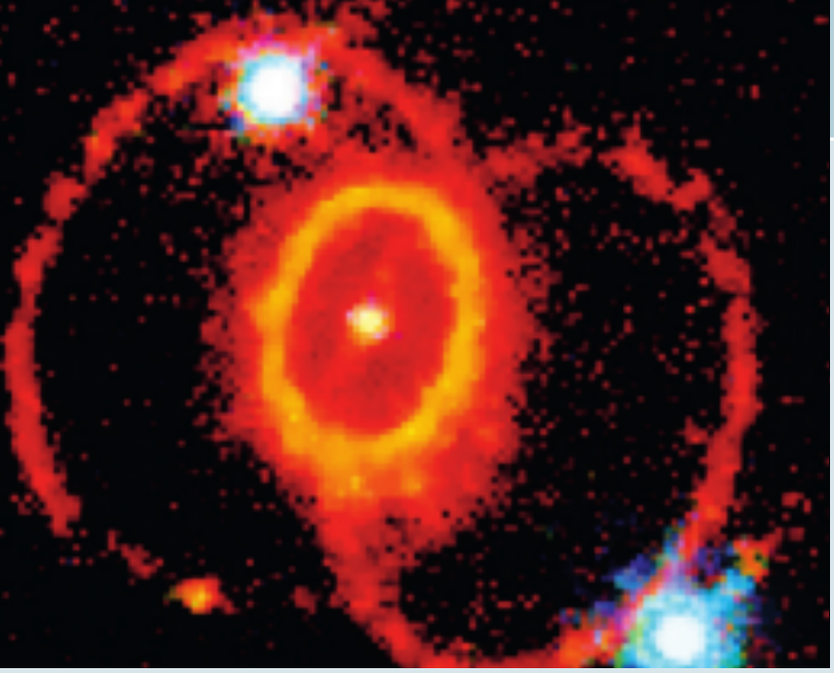
Ydinvoimalaitoksissa on sattunut muutamia vakavia onnettomuuksia. Vuonna 1979 Yhdysvaltojen Harrisburgissa teknisten vikojen ja inhimillisten virheiden vuoksi kevytvesireaktorin sydän osittain suli. Voimalan turvajärjestelmät toimivat, mutta silti onnettomuusalueen puhdistus kesti 14 vuotta. Ympäristöhaitat jäivät vähäisiksi, ja henkilövahinkoja ei sattunut.

Vuonna 1986 Ukrainan Tšernobylissä tehtiin reaktorin toiminnan turvallisuuteen liittyviä kokeita, jotka epäonnistuivat työntekijöiden virheiden ja teknisten ongelmien takia. Reaktori ylikuumeni, ja hidastinaineena käytetyt grafiittisauvat (1 700 tonnia) syttyivät tuleen. Seurauksena oli höyryräjähdys ja muutamia päiviä kestänyt tulipalo, jossa savun mukana ilmakehään pääsi suuria määriä radioaktiivisia aineita.

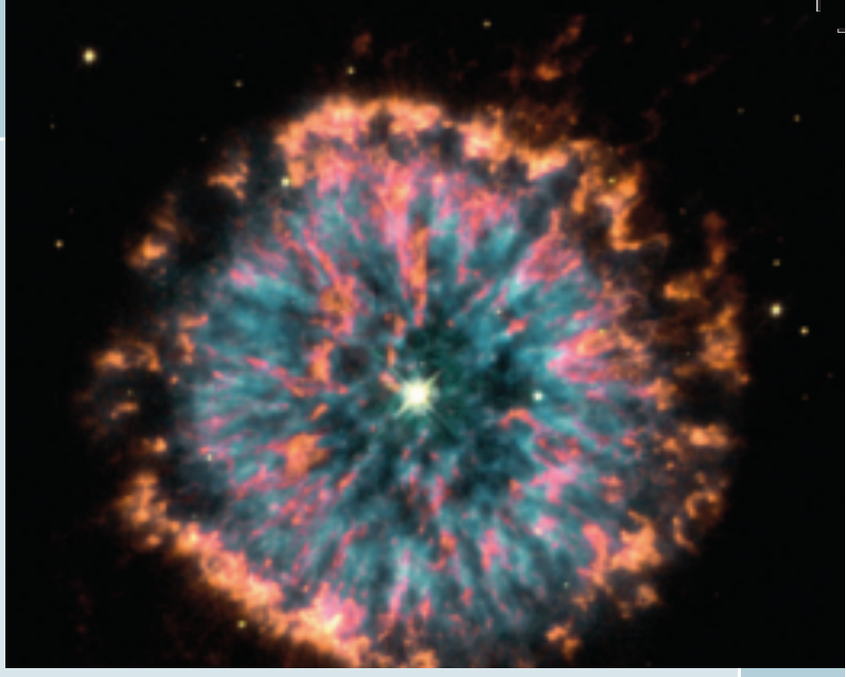
Tšernobylin onnettomuudessa kuoli välittömästi useita ihmisiä, ja myöhemmin säteily on aiheuttanut lukuisia sairastumisia ja kuolemia. Ympäristöhaitat olivat vakavia laajalla alueella. Onnettomuuden aiheuttamat päästöt kulkeutuivat tuulien mukana Suomeen asti. Radioaktiivisia aineita tuli Suomen maaperään ja vesistöihin sateiden mukana.

Vuonna 2011 tapahtui Japanin edustalla merenpohjassa voimakas maanjäristys, joka yhdessä voimakkaan tsunamin kanssa vaurioitti Fukushiman ydinvoimaloita. Esimerkiksi sähköjärjestelmät rikkoutuivat, minkä seurauksena useat reaktorit kärsivät jäähdytysongelmista. Reaktoreissa oli tulipaloja sekä räjähdyksiä ja polttoainesauvat sulivat. Vaurioiden seurauksena ympäristöön vapautui radioaktiivisia saasteita.

Fukushiman ydinvoimalan reaktorit vaurioituivat pahoin.



Hubble-teleskoopin kuva supernovajäänteestä SN1987A.



Auringon kaltaisten tähtien loppuräjähdyksessä syntyy planetaarinen sumu (kuvassa NGC 6751), jonka mukana tähden uloimpien osien alkuaineet sinkoutuvat avaruuteen.

Alkuaineiden synty

Alkuräjähdysteorian mukaan nykyinen maailmankaikkeus sai alkunsa noin 13,7 miljardia vuotta sitten **alkuräjähdyksessä** (*Big Bang*). Alkuräjähdyksen ensihetkinä syntyi maailmankaikkeuden aineen rakenneosasia, esimerkiksi elektronit, protonit ja neutronit.

Myös kaikki maailmankaikkeuden vety ja pieni osa deuteriumia, heliumia ja litiumia on peräisin alkuräjähdyksestä. Kevyistä alkuaineista syntyi vähitellen tähtiä, joissa kaikki muut alkuaineet ovat syntyneet.

Aurinko ja muut tähdet ovat suureksi osaksi vetyä ja heliumia sisältäviä kaasupalloja. Niiden energiantuotto perustuu ydinreaktioihin: ne ovat luonnon fuusioreaktoreita. Tähtien sisuksissa lämpötila on yli 10 miljoonaa kelviniä ja paine on niin suuri, että vetyytimet eli protonit fuusioituvat.

Fuusiossa muodostuu ensin deuteriumytimiä ($^{2}_{1}$H-ytimiä) ja näistä edelleen heliumytimiä (ks. protoniketju s. 154). Heliumytimistä muodostuu raskaampia ytimiä, kuten hiiltä, typpeä, happea ja piitä. Raskaimmissa tähdissä syntyy myös keskiraskaita ytimiä, esimerkiksi rautaa ja nikkeliä.

Tähden elinkaaren loppuvaiheessa fuusioiden tuottama energia alkaa vähentyä. Tällöin tähden sisus jäähtyy ja painovoima puristaa tähden keskustassa olevan aineen kasaan. Tähden loppuvaiheen kehitys ja silloinen alkuaineiden synty riippuvat tähden massasta. Aurinkoa paljon suurempien tähtien elinkaaren lopussa tapahtuu supernovaräjähdys. Tällöin keskiraskaiden ytimien yhdistyessä syntyy myös rautaa raskaampia alkuaineita, kuten kultaa, lyijyä ja uraania.

Osa tähden aineesta sinkoutuu räjähdyksessä avaruuteen uusien tähtien, planeettojen ja ihmistenkin rakennusaineiksi. Kaikki rautaa raskaammat alkuaineet ovat peräisin supernovaräjähdyksistä.

Tehtäviä

7-1. *John Cockcroft* (1897–1967) ja *Ernest Thomas Walton* (1903–1995) onnistuivat vuonna 1932 ensimmäisinä halkaisemaan atomin ytimen. He saivat vuonna 1951 Nobel-palkinnon ytimen muuttamisesta toiseksi ytimeksi kiihdytettyjen hiukkasten avulla. Selvitä, minkälaisesta ydinreaktiosta oli kyse.

7-2. a) Selvitä, mitä tarkoittaa neutronisieppaus.
b) Miksi ytimen hajottaminen on huomattavasti vaikeampaa kuin atomin ionisoiminen?

7-3. Uraanin isotooppi $^{235}_{92}\mathrm{U}$ on ydinvoimaloissa käytetty polttoaine.
a) Kuinka suuri on tämän isotoopin osuus luonnon uraanissa?
b) Kuinka suuri on tämän isotoopin osuus rikastetuissa polttoainesauvoissa?
c) Miksi uraania pitää rikastaa?

7-4. Uraanin puoliintumisaika on miljoonia vuosia. Miksi käytetyn polttoaineen aktiivisuus kuitenkin alenee jo ensimmäisen vuoden aikana noin yhteen prosenttiin?

7-5. a) Täydennä ydinreaktioyhtälöt.

1) $__ + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{42}_{20}\mathrm{Ca}$

2) ${}^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow \gamma + 2__$

3) ${}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{13}_{7}\mathrm{N} + __$

4) ${}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{14}_{6}\mathrm{C} + __$

5) ${}^{2}_{1}\mathrm{H} + \gamma \rightarrow {}^{1}_{0}\mathrm{n} + __$

b) Laske reaktioenergia a-kohdan tapauksessa 1.

7-6. a) Laske reaktiossa
${}^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{143}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{90}_{36}\mathrm{Kr} + 3\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$ vapautuva energia ($m(^{143}\mathrm{Ba}) = 142{,}920627$ u).
b) Laske energia, joka vapautuu fuusioreaktiossa ${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$.

7-7. Ydinvoimalan sähköteho on 440 MW.
a) Kuinka paljon ainetta reaktorissa muuttuu energiaksi vuorokaudessa, kun 30 % ydinreaktorin tuottamasta energiasta voidaan muuttaa sähköksi?
b) Laske fissioiden lukumäärä, kun yhden uraaniytimen halkeamisessa vapautuu noin 200 MeV energiaa.

7-8. Laboratorion neutronilähteenä käytetään radioisotooppia $^{252}\mathrm{Cf}$, joka hajoaa mm. itsestään fissioitumalla siten, että puoliintumisaika on 2,64 a.
a) Selitä käsitteet fissio ja puoliintumisaika.
b) Lähteen neutronituotto on ostohetkellä $9{,}5 \cdot 10^{6}$ n/s. Kuinka monta neutronia sekunnissa lähteestä emittoituu 6,5 vuoden kuluttua ostohetkestä? [S2004, 9]

7-9. Kahden deuteriumytimen välillä voi tapahtua kaksi yhtä todennäköistä fuusioreaktiota. Fuusiossa voi muodostua tritiumydin ja protoni, jolloin vapautuu energiaa 4,0 MeV. Tuloksena voi olla myös ^{3}He-ydin ja neutroni, jolloin energiaa vapautuu 3,3 MeV.
a) Kirjoita fuusioreaktioiden yhtälöt.
b) Laske vapautuva energia kilowattitunteina, kun 2,0 g (noin 1,0 moolia) deuteriumytimiä reagoi keskenään olosuhteissa, joissa kumpikin reaktio on yhtä todennäköinen.

7-10. Kun kaksi deuteriumatomia fuusioituu, reaktiossa vapautuu energiaa 4,03 MeV. Merivedessä on yhtä deuteriumatomia kohti 6 500 vetyatomia.
a) Kuinka paljon 1,0 kg merivettä sisältää tämän perusteella fuusioenergiaa? Veden sisältämä suola jätetään huomiotta.
b) Kuinka pitkälle bensiiniä käyttävä auto kulkee tällä energiamäärällä, kun polttoaineen kulutus on 7,4 kg/100 km? [Oulun yliopisto 1993]

Testaa, osaatko

Oikeita vastausvaihtoehtoja voi olla yksi tai useampia.

1. Tähtien energiantuotanto perustuu
a) fuusioon
b) fissioon
c) fuusioon ja fissioon.

2. Raskaiden ytimien fissioreaktiossa sidososuus
a) pienenee
b) ei muutu
c) kasvaa.

3. Uraanin fissiota voidaan kuvata ydinreaktioyhtälöllä $^{235}U + n \rightarrow X + Y + 2n$. Mitkä seuraavista aineista voivat olla tytärytimet X ja Y?
a) ^{141}Xe ja ^{93}Sr
b) ^{156}Nd ja ^{97}Ge
c) ^{39}Cs ja ^{95}Rb

4. Fissioreaktorissa
a) energiaa vapautuu hallitun ketjureaktion vuoksi
b) käytetään rikastettua uraania, jonka ^{235}U-pitoisuus on noin 5 %
c) termiset neutronit saavat aikaan fission.

5. Eksoergisessä ydinreaktiossa
a) massavaje on positiivinen
b) energiaa sitoutuu
c) tarvitaan ns. kynnysenergia reaktion käynnistämiseksi.

6. Fuusioreaktio
a) takaa tähtien energiantuoton
b) vaatii yleensä hyvin korkean lämpötilan
c) tarkoittaa kevyiden ytimien yhtymistä raskaammiksi alkuaineiksi.

7. Auringossa massaa muuttuu energiaksi $4{,}3 \cdot 10^9$ kg sekunnissa. Auringosta vapautuu vuorokaudessa energiaa
a) $3{,}3 \cdot 10^{31}$ J
b) $33 \cdot 10^{31}$ J
c) $3\,300 \cdot 10^{31}$ J.

8. Ydinvoimalan reaktorin lämpöteho on 2 200 MW. Vuorokaudessa vapautuvan energian määrä on
a) 0,2 MJ
b) 140 MJ
c) $1{,}9 \cdot 10^{14}$ J.

9. Käytetyt ydinvoimalan polttoaineniput
a) säilytetään vesialtaissa muutaman vuoden ajan, jolloin vesi jäähdyttää niitä
b) loppusijoitetaan Suomessa kallioperään noin 500 m:n syvyydelle
c) voidaan jälleenkäsitellä ja käyttää osittain uuden polttoaineen valmistukseen.

10. Ydinvoimalan kiehutusvesireaktorissa
a) ketjureaktion nopeutta voidaan säädellä booria sisältävien säätösauvojen avulla
b) polttoaineniput vaihdetaan muutaman vuoden välein
c) syntynyt vesihöyry ohjataan pyörittämään turbiineja ja generaattoria.

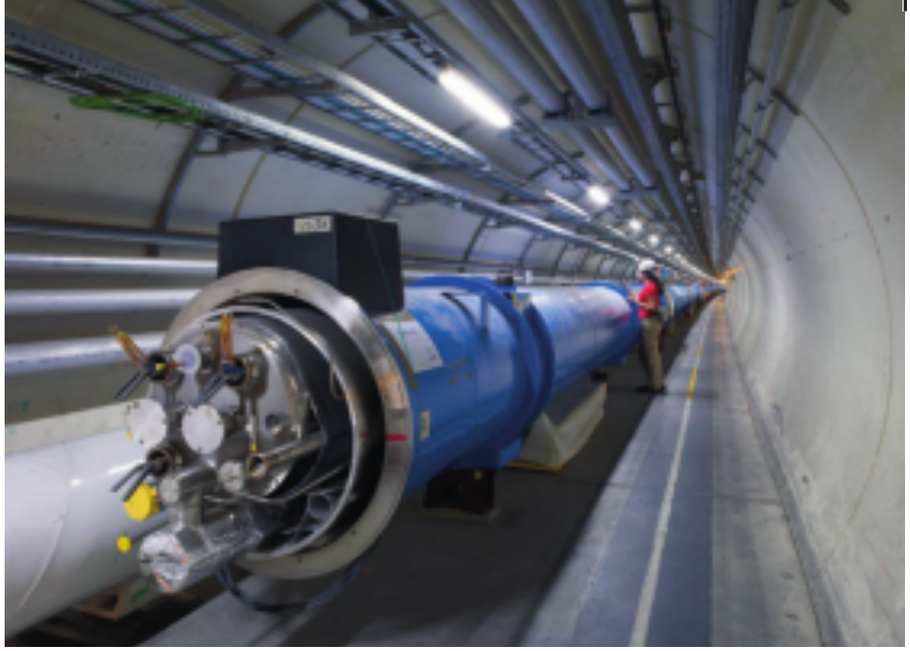
Tiivistelmä

- Keinotekoisia ydinreaktioita saadaan aikaan pommittamalla ytimiä protoneilla, deuteroneilla, alfahiukkasilla, raskaammilla ytimillä ja neutroneilla.
- Energiaa tuottavan (eksoergisen) reaktion massavaje on positiivinen ja energiaa sitovan (endoergisen) reaktion massavaje negatiivinen.
- Ytimen sidosenergia on se energia, joka tarvitaan ytimen hajottamiseen erillisiksi nukleoneiksi.
- Ydinenergian tuotannon fysikaalinen perusta on sidososuuden $b = \frac{E_B}{A}$ kasvaminen sekä fissiossa että fuusiossa.
- Fissioilla tarkoitetaan raskaiden ytimien halkeamista.
- Fuusioreaktiot tuottavat tähtien energian. Tärkein tähtien, kuten Auringon, energiantuotantoprosessi on vedyn muuttuminen heliumiksi fuusioiden tuloksena.
- Ydinvoimalaitosten energia on peräisin fissioista. Ydinreaktoreissa ytimien halkeamisissa vapautuvat neutronit ylläpitävät fissioiden ketjureaktiota.
- Vain hitaat (termiset) neutronit halkaisevat uraanin isotoopin $^{235}_{92}\mathrm{U}$-ytimen.

8 Hiukkasfysiikka

Tässä luvussa opit
- **standardimallin**
- **perushiukkaset**
- **hiukkaskiihdyttimet.**

Keskeisiä käsitteitä ovat
- **kvarkit ja leptonit**
- **välittäjähiukkaset.**



Euroopan hiukkasfysiikan tutkimuskeskuksen CERNin LHC (*Large Hadron Collider*) -kiihdytin on maailman suurin hiukkaskiihdytin.

8.1 Standardimalli

Hiukkasfysiikka kuvaa luonnon toimintaa sen perimmäisellä tasolla. Tutkimuskohteena ovat atomin ydintä pienempien aineen osasten rakenne ja vuorovaikutukset. Kun ainetta jaetaan pienempiin ja pienempiin osiin, päädytään lopulta aineen alkeellisimpiin rakenneosasiin, perushiukkasiin. Alkuräjähdysmallin mukaan maailmankaikkeuden alkuhetkinä aine oli perushiukkasten muodossa ja kaikkia perushiukkasia oli yhtä paljon. Hiukkasfysiikan lakien ja hiukkasten ominaisuuksien tunteminen on tärkeää, kun selvitetään maailmankaikkeuden syntyä ja kehitystä.

Aine koostuu **perushiukkasista**, joita nykykäsityksen mukaan ovat **kvarkit** ja **leptonit**. Perushiukkasten ajatellaan olevan pistemäisiä, koska niissä ei ole ilmennyt sisäistä rakennetta. Protonia ja neutronia pidettiin pitkään atomin ytimen alkeellisimpina rakenneosasina, mutta nyt niiden tiedetään koostuvan kvarkeista. Ne eivät siis ole perushiukkasia. Elektroni on perushiukkanen ja kuuluu leptoneihin. Perushiukkasia ja kvarkeista muodostuneita hiukkasia kutsutaan yhteisesti **alkeishiukkasiksi** (ks. s. 170).

Perushiukkaset vuorovaikuttavat toistensa kanssa. **Vuorovaikutus** ilmenee siten, että hiukkaset tuntevat voimavaikutuksen. Vuorovaikutuksessa hiukkanen voi myös muuttua toisiksi hiukkasiksi. Kaikki luonnossa ilmenevät voimat ja luonnonilmiöt liittyvät perimmiltään perushiukkasten välisiin vuorovaikutuksiin. Perushiukkasia ja niiden vuorovaikutuksia kuvaavaa teoriaa kutsutaan

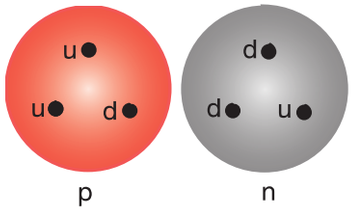
hiukkasfysiikan standardimalliksi. Se yhdistää yhteen teoriaan kaikki tunnetut perushiukkaset ja vuorovaikutukset välittäjähiukkasineen, lukuun ottamatta gravitaatiota.

Perushiukkasten perheet

Standardimallin mukaan aineen perushiukkaset jakautuvat **kolmeen perheeseen**, jotka ovat **elektronin**, **myonin** ja **taun perheet**. Jokaiseen perheeseen kuuluu neljä perushiukkasta, kaksi leptonia ja kaksi kvarkkia. Esimerkiksi elektronin perheeseen kuuluvat elektroni ja elektronin neutriino, jotka ovat leptoneita, sekä u-kvarkki ja d-kvarkki. Kaikki **näkyvä aine** rakentuu **elektronin perheen hiukkasista**.

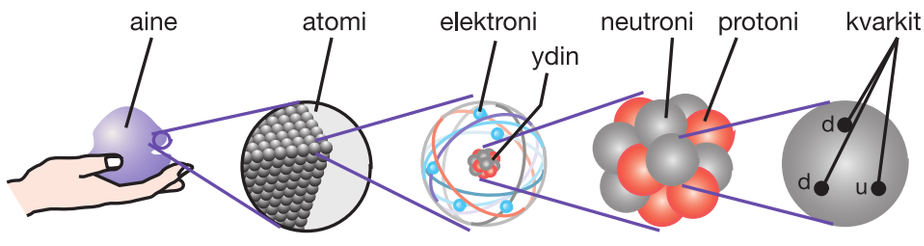
Perushiukkasten kolme perhettä

	Varaus	Elektronin perhe	Myonin perhe	Taun perhe
Kvarkit	$\frac{2}{3}e$	ylös-kvarkki u (up)	lumo-kvarkki c (charm)	tosi-kvarkki t (truth tai top)
	$-\frac{1}{3}e$	alas-kvarkki d (down)	outo-kvarkki s (strange)	kaunis-kvarkki (tai pohja-kvarkki) b (beauty tai bottom)
Leptonit	$-e$	elektroni e	myoni μ	tau τ
	0	elektronin neutriino ν_e (nyy)	myonin neutriino ν_m	taun neutriino ν_t



Protonin ja neutronin kvarkkirakenne.

Kvarkkeja ei esiinny yksin, vaan ne muodostavat aina jonkin hiukkasen. Protoni sisältää kaksi ylös-kvarkkia sekä yhden alaskvarkin (uud) ja neutroni yhden ylös-kvarkin sekä kaksi alaskvarkkia (udd). u-kvarkin sähkövaraus on $+\frac{2}{3}e$ ja d-kvarkin varaus $-\frac{1}{3}e$, joten protonin varaus on $+1e$ ja neutronin 0. Leptonit sen sijaan voivat esiintyä yksin ja vapaana.

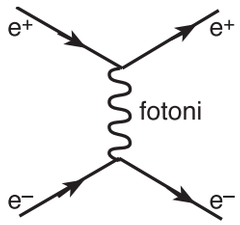


Kaikki näkyvä aine koostuu elektronin perheen hiukkasista eli u- ja d-kvarkeista sekä elektroneista.

Vuorovaikutukset

Perushiukkasten välillä tapahtuvia vuorovaikutuksia kutsutaan **perusvuorovaikutuksiksi**. Ne määräävät, miten perushiukkaset reagoivat toisiinsa ja miten niistä muodostuu esimerkiksi nukleonien, atomien ja molekyylien kaltaisia rakenteita. Perusvuorovaikutuksia ovat sähkömagneettinen vuorovaikutus, vahva vuorovaikutus, heikko vuorovaikutus ja gravitaatiovuorovaikutus.

Hiukkasfysiikan standardimalli kuvaa näistä vuorovaikutuksista kolmea ensimmäistä. Gravitaatiovuorovaikutus ei ole mukana standardimallissa. Standardimalli selittää perusvuorovaikutukset **välittäjähiukkasten avulla**. Kullakin perusvuorovaikutuksella on oma välittäjähiukkasensa, jonka vuorovaikutuksen osapuolet ottavat vastaan ja luovuttavat.

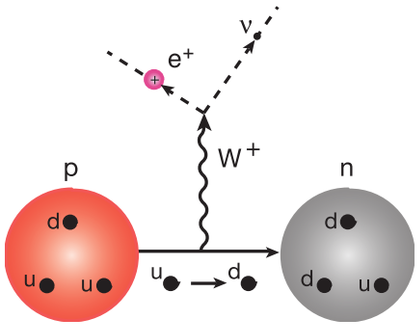


Elektronin ja positronin sähkömagneettinen vuorovaikutus tapahtuu fotonin välityksellä.

Sähkömagneettisen vuorovaikutuksen välittäjähiukkanen on **fotoni**. Sähkömagneettinen vuorovaikutus käsittää sekä sähköiset että magneettiset vuorovaikutukset. Elektronit sitoutuvat atomissa ytimen ympärille sähkömagneettisen vuorovaikutuksen seurauksena. Kahden varatun hiukkasen välinen sähköinen vuorovaikutus tapahtuu siten, että fotoneita siirtyy hiukkasesta toiseen.

Vahvan vuorovaikutuksen avulla kvarkit muodostavat protoneja ja neutroneja sekä protonit ja neutronit atomiytimiä. Perushiukkasista vain kvarkit tuntevat vahvan vuorovaikutuksen. Vahvan vuorovaikutuksen välittäjähiukkasina toimivat **gluonit**, joita on kahdeksan erilaista. Gluonit ovat massattomia hiukkasia. Sitä kvarkin ominaisuutta, jonka takia kvarkki tuntee vahvan voiman vaikutuksen, kutsutaan värivaraukseksi. Värivaraus on kvarkin tietylle ominaisuudelle annettu symbolinen nimitys.

Vaikka vahva vuorovaikutus vaikuttaa varsinaisesti yhden hiukkasen sisällä olevien kvarkkien välillä, kvarkit vuorovaikuttavat jonkin verran myös lähellä olevan toisen hiukkasen kvarkkien kanssa. Esimerkiksi ytimessä protonin ja neutronin välillä vallitseva ydinvoima johtuu siitä, että protonin kvarkit ja neutronin kvarkit vuorovaikuttavat jonkin verran toistensa kanssa. Ydinvoima on siis seurausta kvarkkien välillä vallitsevasta vahvasta vuorovaikutuksesta.



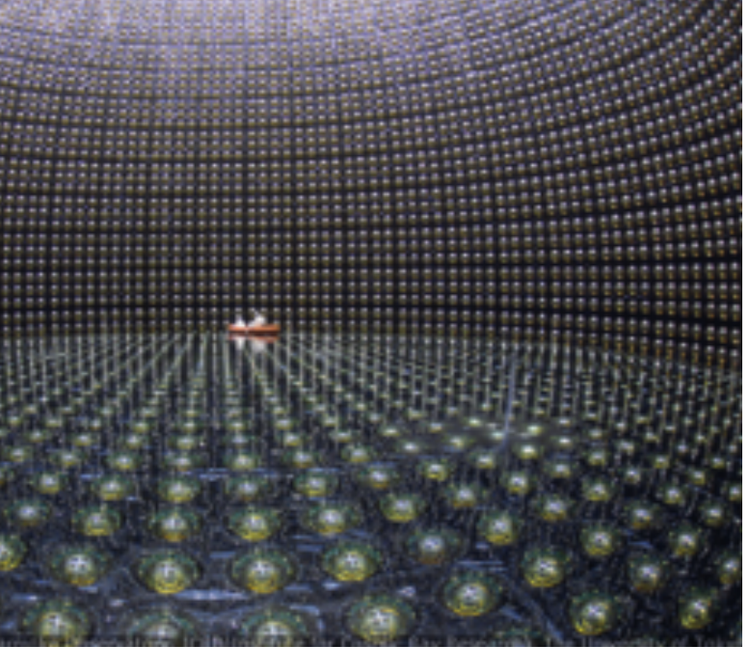
Heikon vuorovaikutuksen välittäjähiukkasia ovat välibosonit W^+, W^- ja Z^0. Ne löydettiin Euroopan hiukkasfysiikan tutkimuskeskuksessa CERNissä vuonna 1983. Heikko vuorovaikutus ilmenee mm. beeta-radioaktiivisuudessa (ks. s. 110).

Neutriinoilla heikko vuorovaikutus on ainoa vuorovaikutustapa. Tämän takia neutriinot kulkevat aineessa lähes esteettä ja heikko vuorovaikutus on harvinainen tapahtuma. Useimmat neutriinot kulkevat suoraan maapallon läpi vuorovaikuttamatta yhdenkään maapallon atomin kanssa. Neutriinoja on siten myös hyvin vaikea tutkia kokeellisesti: niistä vain hyvin harva aiheuttaa mittalaitteessa havaittavan signaalin.

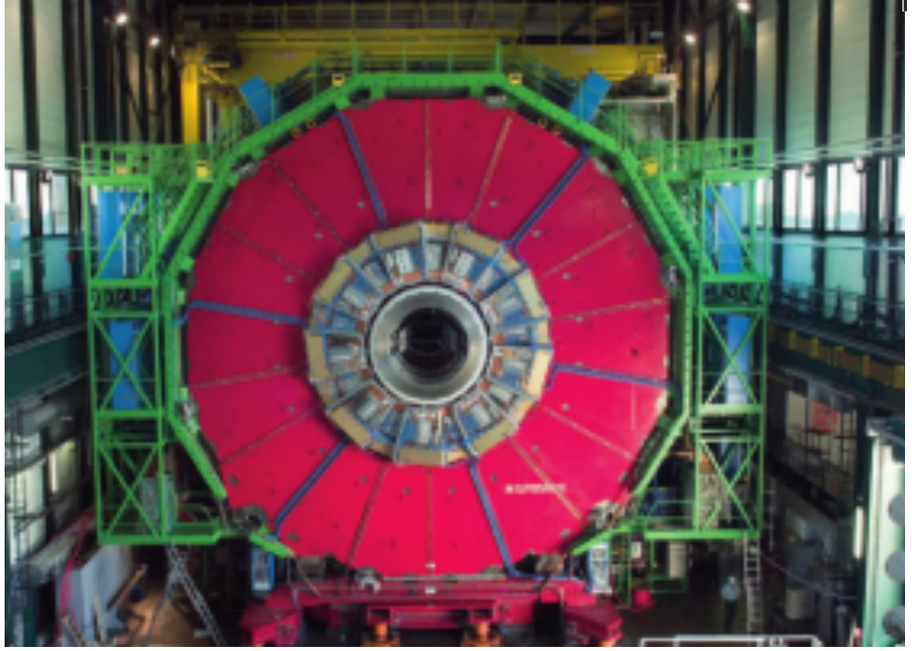
Vuorovaikutukset ja välittäjähiukkaset
Sähkömagneettisen vuorovaikutuksen välittäjähiukkanen on fotoni.
Vahvan vuorovaikutuksen välittäjähiukkanen on gluoni.
Heikon vuorovaikutuksen välittäjähiukkasia ovat välibosonit.

Gravitaatiovuorovaikutus vaikuttaa kaikkiin hiukkasiin, joilla on massa. Se on kaikista perusvuorovaikutuksista heikoin. Gravitaatiovuorovaikutus ei ole mukana standardimallissa, sillä sille ei ole olemassa kvanttimekaniikan huomioivaa teoriaa, kuten muille vuorovaikutuksille. Gravitaatiovuorovaikutuksen oletettua välittäjähiukkasta, gravitonia, ei ole vielä löydetty. Gravitaation yhdistäminen standardimalliin niin, että saataisiin kaikkia vuorovaikutuksia kuvaava teoria, on yksi hiukkasfysiikan suurista haasteista.

Standardimallissa hiukkasten **massat** selitetään ns. Higgsin kentän avulla. Higgsin kentän ajatellaan täyttävän koko avaruuden ja hidastavan hiukkasia, jotka muuten liikkuisivat valon nopeudella. Hiukkasen pienentynyt nopeus ilmenee ominaisuutena, jota kutsumme massaksi. Mitä voimakkaammin Higgsin kenttä vaikuttaa hiukkaseen, sitä suurempi hiukkasen massa on. Tämä malli ennustaa uuden hiukkasen, jota kutsutaan **Higgsin bosoniksi**. Higgsin bosonin löytäminen on kokeellisen hiukkasfysiikan tärkeimpiä tavoitteita.



Japanissa sijaitsevan Super-Kamiokande-ilmaisimen avulla tutkitaan Auringosta tulevia neutriinoja ja ilmakehässä kosmisen säteilyn seurauksena syntyviä neutriinoja sekä hiukkaskiihdyttimellä maankuoren läpi ammuttuja neutriinoja.



Higgsin hiukkasta etsitään mm. CERNin CMS-ilmaisemilla. Koe alkoi vuonna 2010.

8.2 Alkeishiukkaset

Hadronit

Alkeishiukkasilla tarkoitetaan perushiukkasia ja kvarkeista muodostuneita hiukkasia, **hadroneja**. Kvarkit ovat vahvan vuorovaikutuksensa takia aina toisiinsa sitoutuneita ja muodostavat protoneita, neutroneita ja muita hiukkasia. Hadronit jaetaan kvarkkirakenteensa perusteella kahteen ryhmään:

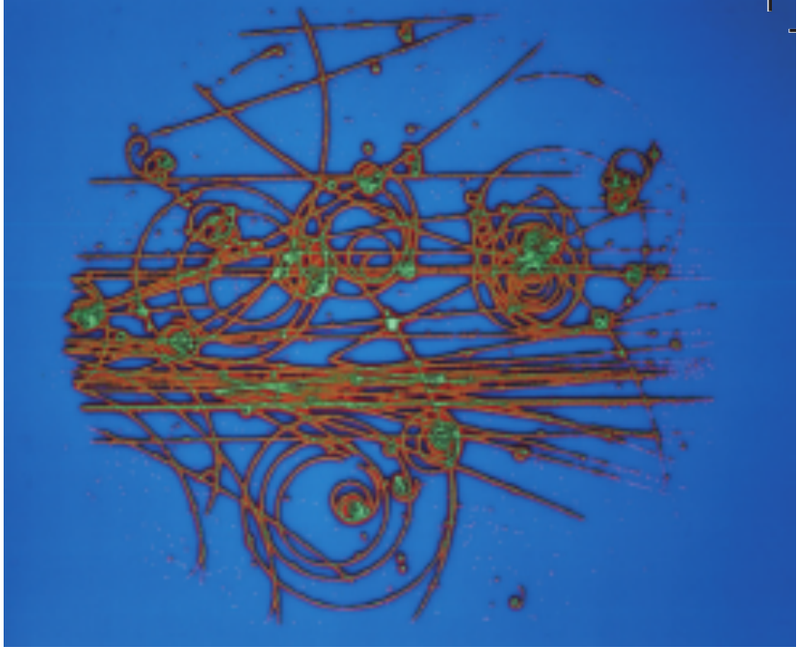
- **Baryonit** ovat kolmen kvarkin muodostamia hiukkasia.
- **Mesonit** ovat kvarkin ja antikvarkin muodostamia hiukkasia.

Protoni ja neutroni ovat kaksi kevyintä baryonia. Erilaisia baryoneja ja mesoneja on löydetty useita satoja. Kvarkit ja antikvarkit voivat olla hadronissa monissa erilaisissa kvanttitiloissa, joista jokainen vastaa eri hiukkasta. Hadroneista ainoastaan protoni on pysyvä hiukkanen, muut hajoavat itsestään. Useimmat hadronit hajoavat niin nopeasti, etteivät ne jätä jälkiä mittalaitteeseen. Niiden olemassaolo päätellään hajoamisessa syntyvien hiukkasten perusteella.

Antihiukkanen ja antiaine

Jokaisella perushiukkasella on **antihiukkanen**. Sillä on sama massa kuin hiukkasella, mutta se eroaa hiukkasesta joidenkin muiden ominaisuuksien osalta – esimerkiksi sen varaus on vastakkainen

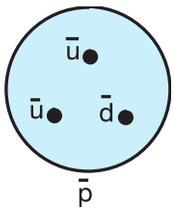
PET-kuvausta (positroniemissiotomografiaa) käytetään ensisijaisesti syöpätautien levinneisyysselvityksissä ja taudin uusiutumisen toteamisessa. Se perustuu annihilaatioon: elimistöön ohjattu beeta-aktiivinen isotooppi tuottaa hajotessaan positronin, joka annihiloituu elektronin kanssa synnyttäen fotoneita (ks. s. 109).



Varattujen hiukkasten radat näkyvät kuplakammiokuvassa.

kuin hiukkasen varaus. Elektronin antihiukkanen positroni oli ensimmäinen löydetty antihiukkanen. Se havaittiin vuonna 1932. Myös kvarkeilla on antihiukkaset, antikvarkit.

Kun hiukkanen ja sen antihiukkanen kohtaavat, ne **annihiloituvat** (ks. s. 113). Annihilaatiossa kummankin massaan sitoutunut energia vapautuu sähkömagneettisen säteilyn energiana, kahtena fotonina: $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$. Toisaalta positroni voi syntyä säteilystä, kun tapahtuu ns. parinmuodostus eli fotoni muuttuu elektroni-positronipariksi. Annihilaatio ja parinmuodostus ovat esimerkkejä Einsteinin esittämästä massan ja energian ekvivalenssista.

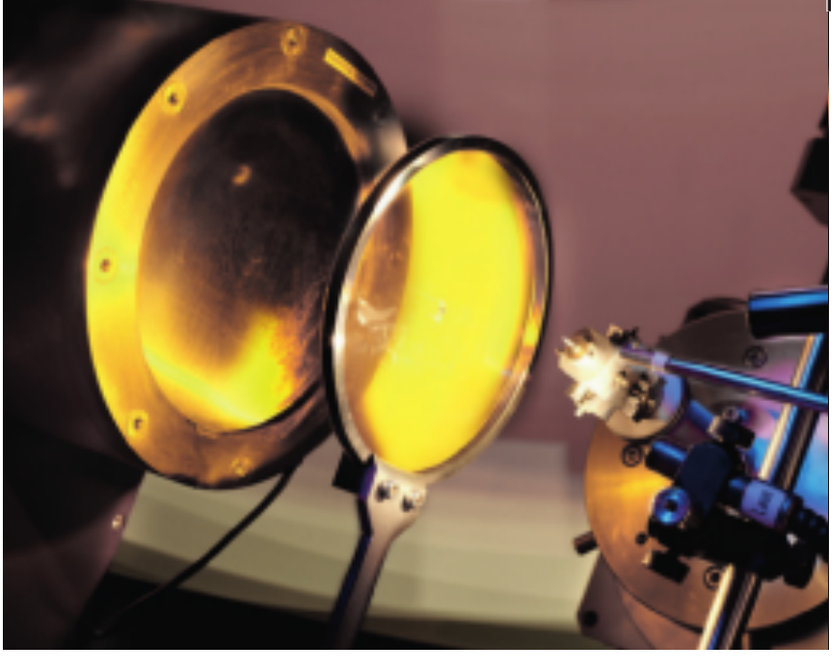


Antiprotonin kvarkkirakenne.

Antihiukkasista voi syntyä atomeja samalla tavalla kuin hiukkasistakin. Antihiukkasista muodostunutta ainetta kutsutaan **antiaineeksi**. CERNissä onnistuttiin vuonna 1995 valmistamaan ensimmäisen kerran antiainetta. Hiukkastörmäyksessä syntyneeseen antiprotoniin saatiin kiinnittymään positroni, jolloin syntyi antivedyn atomi.

Kuplakammiokuva osoittaa antimaterian olemassaolon. Fotoneista on syntynyt elektroni-positronipareja, ja varattujen hiukkasten jäljet näkyvät kuplajonoina ylikuumennetussa nesteessä. Sen sijaan fotonit eivät jätä kuplakammiokuvaan jälkeä. Elektronit ja positronit kaareutuvat magneettikentässä eri suuntiin, koska niillä on vastakkaiset varaukset. Havaintojen mukaan maailmankaikkeudessa ei ole merkittäviä antiainekeskittymiä.

Radiotaajuuskammio on tarkoitettu hiukkasten kiihdyttämiseen.



ESRF (*European Synchrotron Radiation Facility*) Grenoblessa on Euroopan voimakkain synkrotronisäteilylähde.

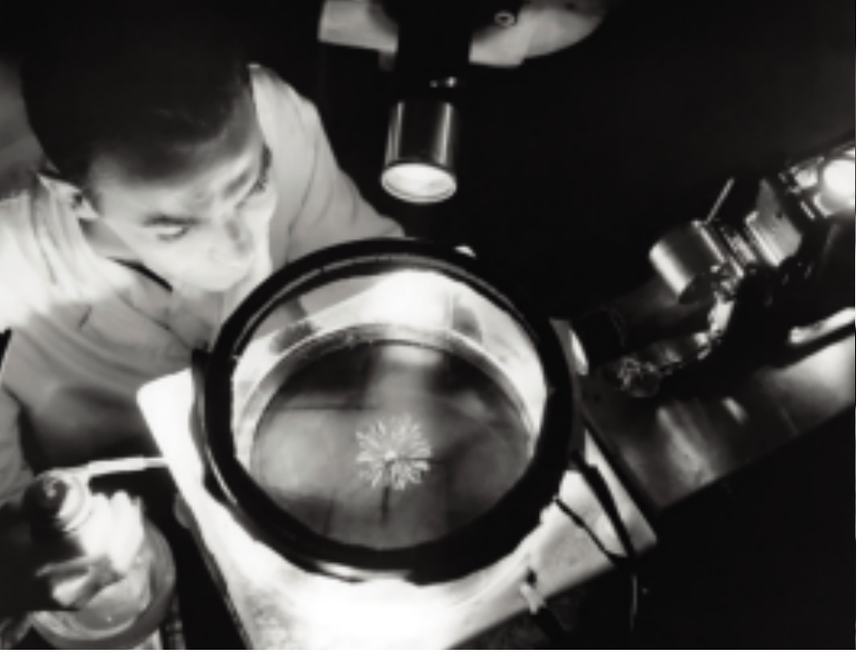
8.3 Hiukkasten tutkiminen

Alkeishiukkasten ominaisuuksista saadaan tietoa tutkimalla niiden vuorovaikutuksia muiden hiukkasten kanssa. Hiukkaset ovat niin pieniä, ettei niitä voi nähdä tehokkaimmallakaan mikroskoopilla. Hiukkasta voidaan pommittaa toisilla hiukkasilla. Esimerkiksi protonin kvarkkirakenteesta on saatu tietoa suurienergiaisen hiukkassuihkun avulla.

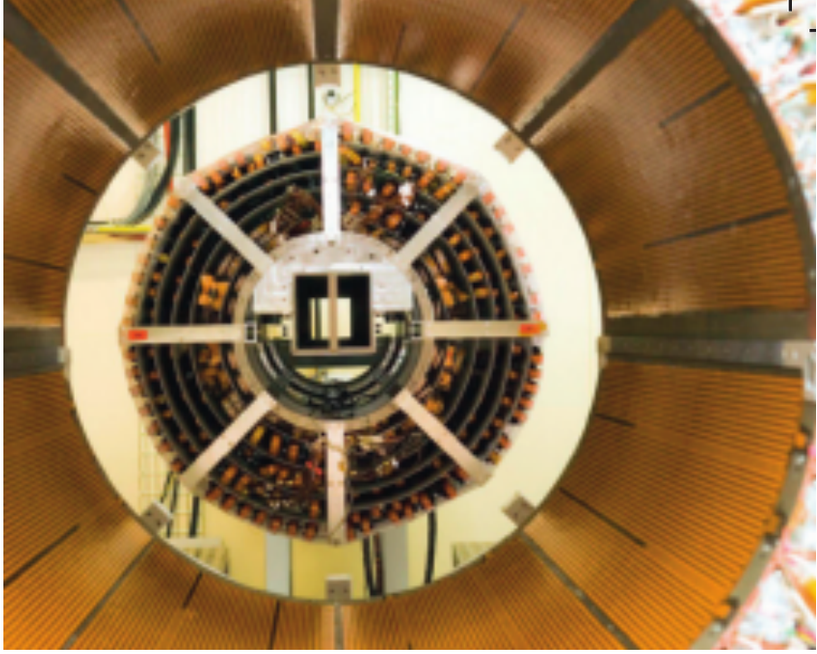
Alkeishiukkasten rakenteen ja vuorovaikutuksien tutkimiseen käytetään **hiukkaskiihdytintä**. Kiihdyttimessä varatut hiukkaset joko kiihdytetään sähkömagneettisen kentän avulla ja ammutaan paikallaan olevaan maalikappaleeseen eli kohtioon tai kaksi vastakkaisiin suuntiin kiihdytettyä hiukkasta törmäytetään toisiinsa. Hiukkassuihkuja ohjataan magneettikenttien avulla.

Hiukkasia voidaan kiihdyttää hiukkaskiihdyttimillä liikkumaan lähes valon nopeudella. Nopeiden hiukkasten liike-energiaa käytetään myös suurimassaisten hiukkasten luomiseen. Esimerkiksi Higgsin hiukkasen tuottaminen vaatii suurienergiaista hiukkassuihkua: m-massainen hiukkanen syntyy vain, jos hiukkasten törmäyksessä on käytettävissä Einsteinin kaavan $E = mc^2$ mukainen määrä energiaa.

Lineaarikiihdytin koostuu peräkkäin sijoitetuista metallisista tyhjiöputkista. Jotta hiukkanen saataisiin suoraviivaiseen kiihtyvään liikkeeseen, putket kytketään vaihtojännitelähteeseen. Kun



Sumukammio.



Puolijohdeilmaisin.

vaihtojännitteen taajuus ja putkien pituudet ovat sopivat, hiukkaseen vaikuttaa jokaisessa peräkkäisten putkien välisessä aukossa kiihdyttävä sähkökenttä.

Kehäkiihdyttimissä hiukkassuihkuja kiihdytetään ympyrän muotoisilla tai spiraalimaisilla radoilla. **Syklotronissa** hiukkassuihku liikkuu magneettikentän ohjaamana spiraalirataa pitkin (ks. Fysiikka 7 -kirjan s. 30). Syklotroneja käytetään esimerkiksi ytimen rakenteen tutkimiseen.

Synkrotronissa hiukkaset kiertävät ympyrärataa pitkin tyhjiöputken sisällä. Hiukkaset kiihdytetään sopivin välein olevissa radiotaajuuskammioissa, joissa ne saavat energiaa sähkömagneettisesta kentästä. Synkrotronissa on useita magneetteja, joiden kenttää vahvistetaan hiukkasten nopeuden kasvaessa niin, että hiukkasten radan kaarevuussäde pysyy vakiona. Magneettikentän maksimiarvo ja radan säde määräävät hiukkasten suurimman nopeuden ja samalla maksimienergian. Synkrotronissa hiukkasilla on aina kiihtyvyyttä, ja siksi ne säteilevät sähkömagneettista säteilyä, jota kutsutaan **synkrotronisäteilyksi**. Nykyisin lähes kaikki tärkeimmät kiihdyttimet ovat synkrotroneja.

Hiukkaskiihdyttimillä tuotettujen hiukkasten havaitsemiseen ja tunnistamiseen käytetään erilaisia **hiukkasilmaisimia**. Ilmaisimilla mitataan hiukkasten energiaa, liikemäärää ja ratoja. Ne voivat myös tunnistaa eri hiukkastyyppejä. Erilaisia ilmaisintyyppejä ovat mm. tuikeilmaisimet, kaasutäytteiset ionisaatioilmaisimet, puolijohdeilmaisimet ja kalorimetrit.

Kuva esittää tilannetta, jossa kaksi toisiinsa törmännyttä galaksirypästä ovat loittonemassa toisistaan. Suurin osa ryppäiden massasta on pimeää ainetta, joka on kuvassa väritetty sinisellä. Punainen on tavallista vuorovaikuttavaa ainetta. Vuorovaikutuksiensa takia se on jäänyt jälkeen pimeästä aineesta. Oikeanpuoleisessa kuvassa galaksiryppäitä ympäröivä pimeä aine on väritetty punaisella.

8.4 Fysiikan tutkimuksen suuret haasteet

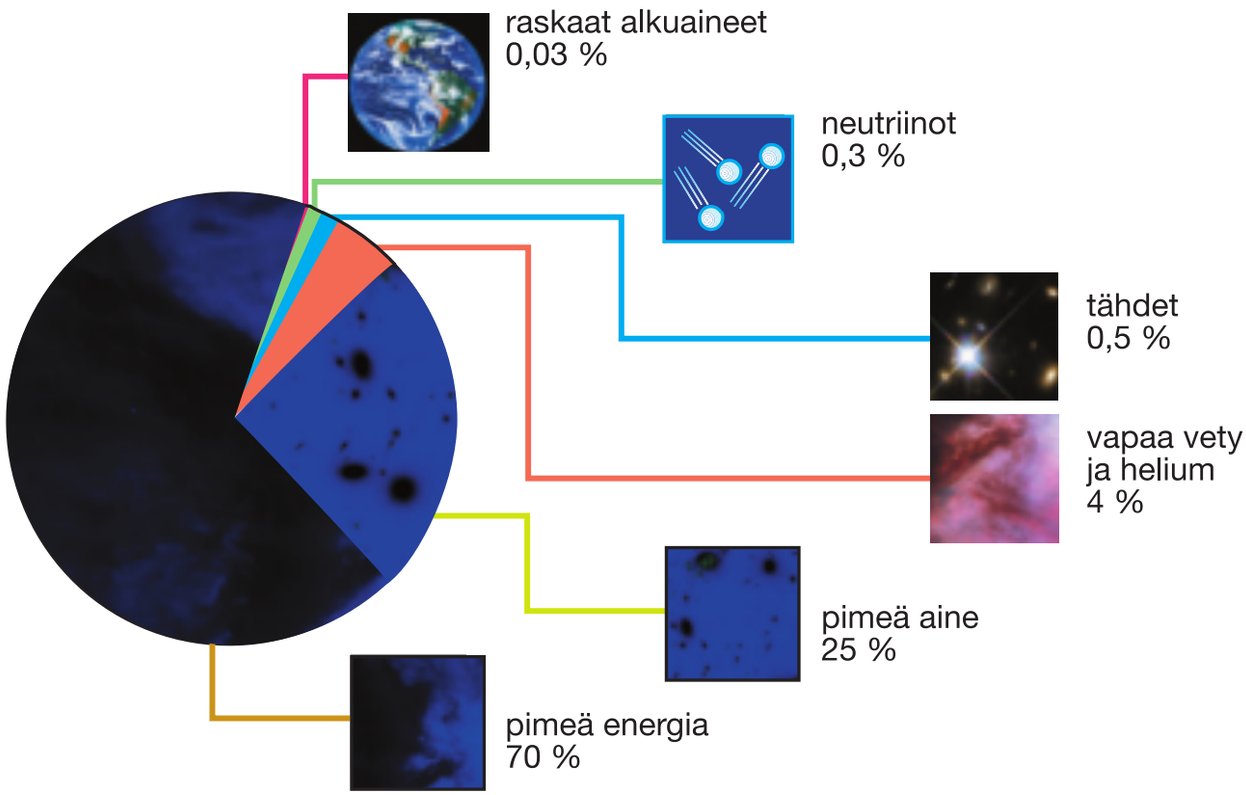
Säteilyn perusteella saadaan tietoa maailmankaikkeudesta. Jo lähes sata vuotta sitten tähtitieteilijät päättelivät, että maailmankaikkeudessa on oltava ainetta, jota emme näe. Havaintojen mukaan galaksijoukoissa galaksit näyttivät liikkuvan liian nopeasti toistensa suhteen: niiden olisi pitänyt erkaantua toisistaan, jollei jokin tuntematon aine olisi vetänyt niitä aiheuttamallaan gravitaatiovoimalla yhteen. Tätä ainetta alettiin nimittää **pimeäksi aineeksi**. Sitä oletetaan olevan kaikkialla maailmankaikkeudessa.

Pimeän aineen vuorovaikutus tavallisen aineen kanssa on vähäistä. Galaksien pyörimistä tutkittaessa on havaittu, että galakseissa pitäisi olla näkyvien tähtien ja kaasupilvien lisäksi muutakin ainetta, jotta pyörimisnopeus täsmäisi teoreettisten laskelmien kanssa. Pimeä aine vaikuttaa pyörimisnopeuteen gravitaatiovaikutuksensa kautta.

Toistaiseksi ei tiedetä, mitä pimeä aine on. Se voisi olla sammuneita tähtiä, syttymättömiä tähtiä, neutriinoja, mustia aukkoja, ruskeita kääpiötähtiä tai tuntemattomia eksoottisia hiukkasia. Yksi ehdokas pimeäksi aineeksi ovat supersymmetriset hiukkaset. Supersymmetriateorian mukaan jokaisella fysiikan standardi-

mallin hiukkasella on olemassa ns. supersymmetrinen pari. Kevyimmän supersymmetrisen hiukkasen oletetaan olevan pysyvä hiukkanen ja vuorovaikuttavan muiden hiukkasten kanssa hyvin vähän, joten se voisi olla pimeää ainetta. Supersymmetrisiä hiukkasia etsitään hiukkaskiihdyttimien avulla, mutta niistä ei ole vielä saatu todisteita.

Vuonna 1998 havaittiin, että maailmankaikkeus ei laajenekaan hidastuen, kuten aiemmin oletettiin, vaan laajenemisnopeus kasvaa (ks. Fysiikka 1 -kirjan s. 123). **Pimeällä energialla** tarkoitetaan jonkinlaista painovoiman vastavoimaa, joka kiihdyttää maailmankaikkeuden laajenemista. Arvellaan, että pimeää energiaa on tasaisesti kaikkialla maailmankaikkeudessa. Koska pimeä energia laajentaa avaruutta kaikkialla, galaksien välimatkat kasvavat kiihtyvällä vauhdilla.



Maailmankaikkeuden koostumus.

Tämän vuosituhannen tärkeitä fysiikan ja kosmologian tutkimuskysymyksiä ovat aineen massan ja neutriinojen olemuksen selvittäminen, gravitonin löytäminen sekä pimeän aineen ja pimeän energian luonteen selvittäminen.

Pohdi ja etsi

8-1. a) Kuinka monta perushiukkasta standardimallin mukaan on olemassa?
b) Mitkä näistä perushiukkasista voivat esiintyä vapaina?
c) Mitkä perusvuorovaikutuksista ovat etävuorovaikutuksia?
d) Vertaile perusvuorovaikutusten kantamaa.
e) Mitkä atomin rakenneosat tuntevat vahvan vuorovaikutuksen?

8-2. a) Luettele perushiukkasten perheet.
b) Vertaile kussakin perheessä olevien hiukkasten massoja toisiinsa. Mitä kaikille perheille yhteisiä säännönmukaisuuksia huomaat?
c) Minkä perheen hiukkasista näkyvä aine rakentuu?
d) Mitkä perushiukkaset tuntevat sähkömagneettisen vuorovaikutuksen?

8-3. Ota selvää, kuka löysi ja milloin
a) elektronin b) protonin
c) neutronin d) positronin
e) kvarkit.

8-4. a) Miten kvarkkien havaitseminen tuli mahdolliseksi?
b) Mitä tarkoittaa kvarkkien vankeus?
c) Mitä tarkoitetaan kvarkkien värillä?
d) Mitä ovat kvarkkien maut?
e) Ota selvää, kuinka paljon voimakkaampi on kvarkkien välinen vahva vuorovaikutus kuin niiden välinen sähkömagneettinen vuorovaikutus.

8-5. a) Kvarkit ja antikvarkit voivat muodostaa erilaisia yhdistelmiä. Millaisia kvarkkiyhdistelmiä ovat
1) baryonit 2) mesonit?
Etsi kummastakin hiukkaslajista esimerkkejä.
b) Protoni ja neutroni rakentuvat elektronin perheen kvarkeista. Ovatko sellaiset hiukkaset mahdollisia, joissa eri perheiden kvarkit yhdistyvät?

8-6. a) Miten on päätelty, että neutriinoja on kolmea eri lajia: elektronin, myonin ja taun neutriino?
b) Milloin neutriino havaittiin ensimmäisen kerran?
c) Miksi neutriinojen havaitsemiseen tarkoitetut ilmaisimet ovat hyvin suuria?
d) Miksi Aurinko säteilee neutriinoja?

8-7. a) Selvitä, minkälaisia hiukkasia nimitetään
1) bosoneiksi 2) fermioneiksi.
Anna esimerkkejä kummastakin hiukkaslajista.
b) Miten supersymmetria liittyy bosoneihin ja fermioneihin?

8-8. a) Miksi hiukkasfyysikot ovat rakentaneet yhä suurempia ja suurempia hiukkaskiihdyttimiä?
b) Mikä on suurin energia, joka hiukkaskiihdyttimellä on saatu aikaan?
c) Mikä on tätä energiaa vastaava aallonpituus?

Testaa, osaatko

Oikeita vastausvaihtoehtoja voi olla yksi tai useampia.

1. Kvarkki on
a) hadronin rakenneosanen
b) perushiukkanen
c) massaton
d) vahvan voiman välittäjähiukkanen.

2. Leptonilla on
a) värivaraus
b) massa
c) vahvoja vuorovaikutuksia
d) heikkoja vuorovaikutuksia.

3. Neutriino on
a) varaukseton
b) kevyin perushiukkanen
c) harvinainen
d) ytimen rakenneosanen.

4. Hadronit ovat
a) perushiukkasia
b) pysyviä hiukkasia
c) rakentuneet leptoneista
d) rakentuneet kvarkeista.

5. Higgsin hiukkanen
a) on ytimen osa
b) liittyy hiukkasten massoihin
c) on massaton
d) on vaikea havaita.

6. Synkrotronissa hiukkanen
a) kiertää ympyrärataa
b) kiertää spiraalirataa
c) säteilee
d) saa lisää energiaa.

7. Pimeä aine
a) ei lähetä sähkömagneettista säteilyä
b) aiheuttaa gravitaatiota
c) vaikuttaa maailmankaikkeuden laajenemiseen
d) on Linnunradan ainesosa.

8. Pimeä energia
a) kiihdyttää maailmankaikkeuden laajenemista
b) on pimeän aineen liike-energiaa
c) on maailmankaikkeuden suurin energiamuoto
d) koostuu hiukkasista.

9. Antiaine
a) koostuu antihiukkasista
b) ei reagoi aineen kanssa
c) on harvinaista
d) on mielikuvituksen tuotetta.

10. Standardimalli
a) kuvaa maailmankaikkeuden laajenemista
b) kuvaa perushiukkasia
c) kuvaa perusvuorovaikutuksia
d) on todistettu oikeaksi.

Tiivistelmä

- Standardimalli kuvaa perushiukkasia ja niiden vuorovaikutuksia välittäjähiukkasineen.
  Perushiukkasia ovat kvarkit ja leptonit. Niitä on kolme perhettä: elektronin perhe, myonin perhe ja taun perhe.

- Perusvuorovaikutukset ovat
  – vahva vuorovaikutus
  – sähkömagneettinen vuorovaikutus
  – heikko vuorovaikutus
  – gravitaatio.

- Hadronit ovat kvarkeista muodostuneita hiukkasia.

- Jokaisella hiukkasella on antihiukkanen. Hiukkanen ja antihiukkanen annihiloituvat eli muuttuvat säteilyksi toisiinsa törmätessään.

- Hiukkaskiihdyttimien peruslajit ovat lineaarikiihdyttimet, syklotronit ja synkrotronit.

- Ilmaisimet ovat hiukkasten tunnistamiseen ja hiukkasten ominaisuuksien mittaamiseen tarkoitettuja laitteita.

- Maailmankaikkeuden energiasta ja massasta noin 70 % on pimeää energiaa ja noin 25 % pimeää ainetta. Tavallisen aineen osuus on vähemmän kuin 5 %.

Kertaustehtäviä

Etsi laskemalla oikea vastausvaihtoehto tehtävissä 1–10.

1. Kemian tutkimuksissa käytetään infrapunasäteilyn pitkäaaltoisemman pään säteilyä, jonka taajuus on 0,30 THz. Tämä säteily kykenee katkaisemaan molekyylien välisiä sidoksia. Kyseistä taajuutta vastaava energia on
a) 1,2 meV b) 1,2 eV c) 12 keV.

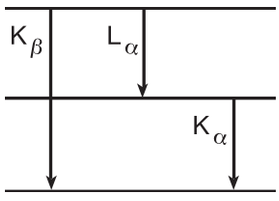
2. Kobolttilevyyn kohdistetaan valoa, jonka aallonpituutta voidaan vaihdella. Suurin mahdollinen sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus, jolla irtoaa fotoelektroneja koboltista, on
a) 250 nm b) 310 nm c) 390 nm.

3. Kuinka suurella jännitteellä elektronisuihkua tulee kiihdyttää elektronimikroskoopissa, jotta sen erotuskyky olisi atomin läpimitan suuruusluokkaa, 10^{-10} m?
a) 70 V b) 150 V c) 2,4 kV

4. Vetyatomi siirtyy energiatilasta $n = 3$ perustilaan. Emittoituvan fotonin taajuus on
a) 1,3 PHz b) 2,1 PHz c) 2,9 PHz.

5. Yksi vetyatomin spektrisarja on Bracketin sarja. Bracketin sarjan pisin aallonpituus on
a) 0,41 μm b) 4,1 μm c) 1,5 μm.

6. Kuparin K_α- ja K_β-ominaissäteilyn aallonpituudet ovat 154 pm ja 139 pm. Kuparin L_α-säteilyn aallonpituus on
a) 293 pm b) 1,43 pm c) 1,43 nm.



7. Rautaytimen $^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ massavaje on
a) 0,52844 g b) 0,52846 u c) 0,51414 u.

8. Rautaytimen $^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ sidososuus on
a) 5,3 MeV b) 8,8 MeV c) 7,9 MeV.

9. Millä tavalla radioaktiiviset ytimet $^{12}\mathrm{N}$ ($Z = 7$) ja $^{12}\mathrm{B}$ ($Z = 5$) hajoavat, jotta syntyy stabiili ydin $^{12}\mathrm{C}$ ($Z = 6$)?
1) molemmat β^+-hajoamisella
2) edellinen β^+- ja jälkimmäinen β^--hajoamisella
3) edellinen β^-- ja jälkimmäinen β^+-hajoamisella
4) molemmat β^--hajoamisella

10. Gammasäteilyn puoliintumispaksuus vedessä on 90,0 mm. Matkavaimennuskerroin on
a) 6,2 $\frac{1}{\mathrm{m}}$ b) 7,7 $\frac{1}{\mathrm{m}}$ c) 8,3 $\frac{1}{\mathrm{m}}$.

11. Mitä tarkoitetaan mustan kappaleen säteilyllä?

12. a) Mitkä ilmiöt tukevat käsitystä, että sähkömagneettisella säteilyllä on aaltoluonne?
b) Mitkä ilmiöt tukevat käsitystä, että sähkömagneettinen säteily koostuu kvanteista?
c) Mitä tarkoitetaan aaltohiukkasdualismilla?
d) Määritä säteilykvantin energia ja liikemäärä, kun säteilyn aallonpituus on 0,154 nm.

13. Energiansäästölampun teho on 11 W, ja syntyvän valon keskimääräinen aallonpituus on 630 nm. Laske lampun emittoimien fotonien lukumäärä sekunnissa.

14. Valosähköistä ilmiötä tutkitaan laboratoriossa. Millainen muutos tutkimuksissa havaitaan, jos
a) säteilyn taajuutta pienennetään
b) säteilyn intensiteettiä suurennetaan
c) säteily kohdistetaan kuparilevyn sijasta sinkkilevyyn?

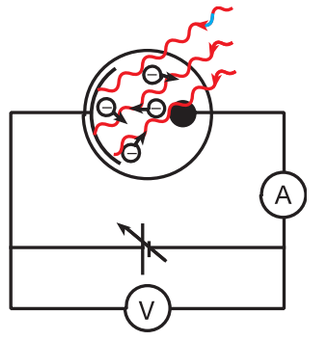
15. a) Elektronien irrotustyö sinkistä on 4,34 eV. Laske sen säteilyn aallonpituus, joka pystyy juuri ja juuri irrottamaan sinkistä elektroneja.
b) Valosähköilmiön kynnysaallonpituus eräälle metallille on 230 nm. Elektronien maksimienergiaksi halutaan 1,5 eV. Laske sen valon aallonpituus, joka antaa kyseisen energian.

16. Valosähköilmiössä elektronien suurin liikeenergia voidaan määrittää pysäytysjännitteen avulla. Mittauksessa käytettiin purkausputkea, jonka metallipintaan kohdistettiin valoa. Purkausputki oli virtapiirin osana. Piirissä oleva virtamittari osoitti sähkövirran kulun. Tietyillä pysäytysjännitteen arvoilla sähkövirran kulku lakkasi. Mittauksessa saatiin seuraavat tulokset:

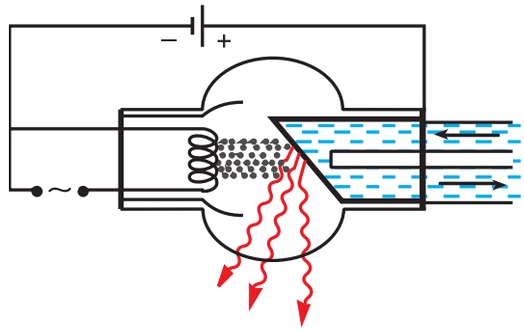
Aallonpituus/nm	385	380	370	349	345
Pysäytysjännite/V	0,11	0,16	0,25	0,46	0,49

Määritä graafisesti
a) elektronien irrotustyö
b) valosähköisen ilmiön kynnystaajuus
c) Planckin vakio.

17. Herkkä virtamittari kytkettiin tyhjiövalokennon elektrodien välille. Katodin metallipintaa valaistiin ensin punaisella laserin valolla, jonka aallonpituus oli 670 nm, ja sitten vihreällä laserin valolla, aallonpituus 543,5 nm. Havaittiin, että jälkimmäisessä tapauksessa valokennon läpi kulki sähkövirta mutta ensimmäisessä tapauksessa ei.
a) Selitä ilmiö.
b) Virta lakkasi kulkemasta, kun kennoon kytkettiin 0,35 V:n vastajännite. Selvitä valokennon katodimateriaali. [K2000, 9]

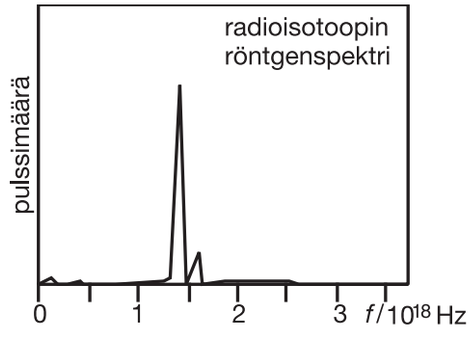


18. a) Selvitä röntgenputken toimintaperiaate.



b) Piirrä ja selitä röntgensäteilyn spektrin muoto.
c) Selvitä röntgensäteilyn käyttösovelluksia.
d) Mitä eroa ja mitä yhteistä on röntgensäteilyllä ja gammasäteilyllä?

19. Eräs radioisotooppinäyte ei lähetä lainkaan alfa-, beeta- tai gammasäteilyä vaan ainoastaan tytäralkuaineelle ominaista K-röntgensäteilyä (kuva).



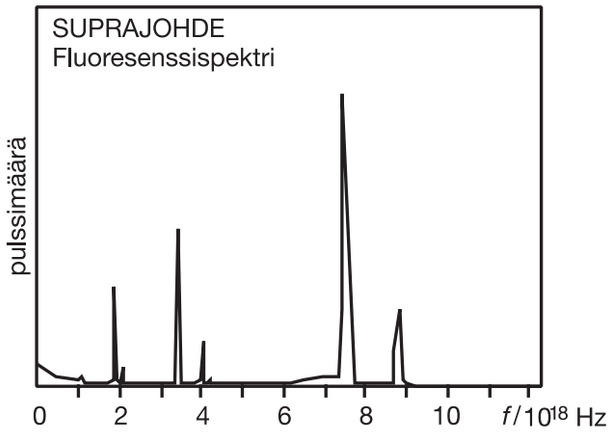
a) Päättele seuraavalla sivulla olevan taulukon avulla, minkä alkuaineen isotooppi tytärydin on.

b) Miksi hajoamisreaktion yhteydessä ei synny gammasäteilyä?
c) Mikä hajoamistapa on ilmeisesti kysymyksessä, ja minkä alkuaineen isotooppi on lähtöydin?

K_α-ominaissäteilyn energioita

Alkuaine	E_{K_α}/keV
Ca	3,7
Mn	5,9
Ni	7,5
Zn	8,6
Cd	23,1

20. Isotooppiherätteinen röntgenfluoresenssianalyysi on kohdetta vahingoittamaton menetelmä, jossa tutkittavaan näytteeseen kohdistettu radioisotoopin gammasäteily saa näytteen atomit lähettämään alkuaineelle ominaista röntgensäteilyä.
a) Miten ominaissäteilyn synty selitetään?



b) Erään keraamisen suprajohteen koostumusta tutkittiin laboratoriossa ^{241}Am-herätteisellä menetelmällä, jolloin saatiin kuvan röntgenfluoresenssispektri. Päättele oheisen taulukon avulla, mitä alkuaineita kyseinen suprajohde sisältää.

Eräitä K-ominaissäteilyn energioita

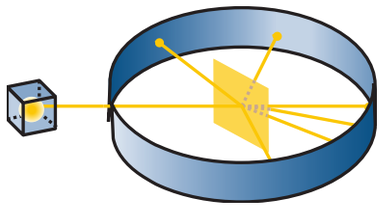
Alkuaine	E_{K_α}/keV	E_{K_β}/keV
Ti	4,5	4,9
Cr	5,4	5,9
Fe	6,4	7,0
Cu	8,0	8,9
As	10,5	11,7
Br	11,9	13,3
Y	14,9	16,7
Mo	17,4	19,6
Ag	22,1	24,9
Sb	26,3	29,7
Ba	32,1	36,3
Ce	34,6	39,3

21. a) Elektronisuihkun kiihdytysjännite on 300 V. Laske elektronien de Broglien aallon aallonpituus.
b) Miten de Broglien aallon aallonpituus liittyy Bohrin vetyatomin elektroniin?
c) Miten de Broglien aallon aallonpituus liittyy elektronimikroskoopin toimintaan?

22. Selitä, mitä tarkoittaa
a) Comptonin ilmiö
b) annihilaatio
c) parinmuodostus.

23. Atomimallien kehittyminen on yksi esimerkki fysikaalisen tiedon täsmentymisestä ja muuttumisesta. Kerro, millainen käsitys atomin rakenteesta oli seuraavilla fyysikoilla.
a) J. J. Thomson (vuonna 1904 ”rusinakakkumalli”)
b) Ernest Rutherford (vuonna 1911 ”aurinkokuntamalli”)
c) Niels Bohr (vuonna 1913 vetyatomimalli)

24. a) Oheinen piirros liittyy Rutherfordin sirontakokeeseen vuodelta 1911. Selvitä Rutherfordin koe ja siitä tehdyt johtopäätökset.



b) Selitä Bohrin vetyatomimallin perusolettamukset. Mitä puutteita Bohrin mallissa oli?

25. Esittele lyhyesti niitä fysiikan kehitykseen vaikuttaneita merkittäviä kokeellisia havaintoja ja oivalluksia, joita tehtiin 1900-luvun vaihteessa.

26. Mitkä kokeelliset havainnot johtivat kvanttifysiikan syntyyn 1900-luvun alussa?

27. Piirrä mallikuva atomin energiatasokaaviosta.
a) Mitä tarkoittavat atomin perustila ja viritystila?
b) Miksi energiatasokaavioon merkityt energiat ovat negatiivisia?
c) Miten kaavioon merkitään atomin virittyminen ja purkautuminen?
d) Miksi alkuaineiden spektrikuvaajat koostuvat erillisistä spektriviivoista?

28. a) Kalsiumin ionisoitumisenergia on 3,1 eV. Mitä ionisoitumisenergia tarkoittaa? Pystyykö sininen valo, jonka taajuus on 0,71 PHz, ionisoimaan kalsiumin?
b) Elohopea-atomin tietty viritystila kestää hyvin pienen ajan (noin 10 ns). Sen jälkeen atomi palaa perustilaansa ja lähettää samalla ultraviolettisäteilyä, jonka aallonpituudeksi mitataan 254 nm. Laske elohopean ultraviolettisäteilyn kvantin energia.

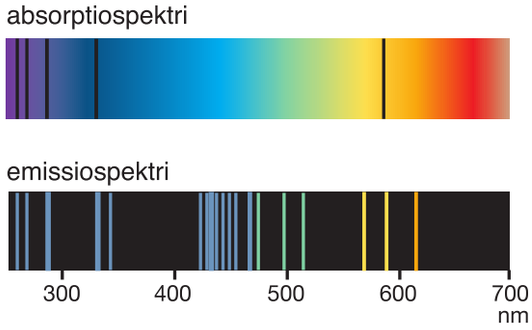
29. Vetyatomin energiatilat saadaan lausekkeesta $E_n = -13{,}6\ \text{eV}/n^2$ ($n = 1, 2, 3, \ldots$). Vetyatomissa elektroni putoaa tilalta $n = 5$ tilalle $n = 1$, jolloin atomi emittoi fotonin. Laske tämän fotonin liikemäärä. Oletetaan, että fotonin lähtösuunta on sama kuin atomin liikesuunta emittoitumishetkellä. Laske fotonin emittoitumisesta aiheutuva atomin nopeuden muutos. [Preliminäärikoe (MFKA) 2004, 12]

30. a) Valokvantin energia on 11 eV. Kvantti osuu perustilassa olevaan vetyatomiin. Voiko vetyatomi absorboida tämän kvantin?
b) Osoita, että vetyatomin spektrin Lymanin sarjan pisin aallonpituus on sähkömagneettisen spektrin ultraviolettivaloalueella.
c) Yksi vetyatomin spektrisarja on Bracketin sarja ($m = 4$). Laske vetyatomin Bracketin sarjan lyhin aallonpituus.

31. Vetyatomin energiatilat saadaan lausekkeesta $E = -\dfrac{13{,}6\ \text{eV}}{n^2}$. Atomaarista vetyä sisältävää kaasua viritetään sähkömagneettisen säteilyn avulla. Kuinka suuri saa säteilyn aallonpituus korkeintaan olla, jotta emissiospektrissä näkyisi Balmerin sarjan H_β ($n = 4 \rightarrow n = 2$)? Piirrä tarvittava osa vedyn energiatasokaaviota ja merkitse siihen em. virittymistä ja H_β-emissiota vastaavat siirtymät.

32. a) Mitä tarkoitetaan kaasujen emissio- ja absorptiospektreillä, ja mistä absorptiospektrin mustat viivat syntyvät?
b) Miten alfa- ja beetasäteilyn energiaspektrit liittyvät ytimen energiatilojen tutkimiseen?
c) Miksi stabiilien ytimien massaluvun kasvaessa neutroniluku kasvaa nopeammin kuin protoniluku?

33. Kuvassa on erään aineen absorptio- ja emissiospektri.
a) Miksi kaikki absorptiospektrin viivat näkyvät kaasun emissiospektrissä?
b) Mitkä spektriviivoista ovat UV-valon alueella?
c) Päättele taulukkokirjan avulla, mistä aineesta on kysymys.



34. Neutronit, joiden energia on 0,020 eV, suunnataan kiteeseen, jonka atomitasojen väli on 0,33 nm. Kuinka paljon kiteestä sironneiden neutronien suunta poikkeaa neutronien tulosuunnasta ensimmäisen kertaluvun heijastuksessa? Käytä Braggin lakia.

35. a) Selvitä käsitteet ydin, vahva vuorovaikutus, sidosenergia ja massavaje.
b) Miksi sekä fissio- että fuusioreaktio voivat vapauttaa energiaa?

36. a) Laske happiytimen $^{16}_{8}\mathrm{O}$ massavaje.
b) Laske kultaytimen $^{197}_{79}\mathrm{Au}$ sidosenergia.
c) Laske amerikiumytimen $^{243}_{95}\mathrm{Am}$ sidososuus.
Anna kussakin kohdassa vastaus kuuden merkitsevän numeron tarkkuudella.

37. Neutroni hajoaa reaktioyhtälön $\mathrm{n} \rightarrow \mathrm{p} + \mathrm{e}^- + \overline{\nu}$ mukaisesti. Laske vapautuva energia.

38. Radium-226 hajoaa α-emissiolla seuraavasti: $^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$.
a) Laske hajoamisessa vapautuva energia.
b) Mikä on tytärhiukkasten liike-energioiden suhde kolmen merkitsevän numeron tarkkuudella, kun oletetaan, että $^{226}\mathrm{Ra}$-ydin on levossa hajoamisen tapahtuessa?
c) Miksi edellisissä voi käyttää atomimassoja ydinten massojen asemesta?

39. Neodyyminuklidi $^{144}_{60}\mathrm{Nd}$ hajoaa α-säteilyä emittoiden ceriumnuklidiksi $^{140}_{58}\mathrm{Ce}$. Laske α-hiukkasen liike-energia neljän merkitsevän numeron tarkkuudella.

40. a) Kloorin isotooppi $^{33}_{17}\mathrm{Cl}$ on β^+-aktiivinen ja isotooppi $^{40}_{17}\mathrm{Cl}$ on β^--aktiivinen. Kirjoita beetahajoamista kuvaavat yhtälöt. Kuinka suuri on kummankin isotoopin beetasäteilyn suurin energia?
b) Kalsium-nuklidi $^{41}_{20}\mathrm{Ca}$ sieppaa elektronin. Kirjoita reaktioyhtälö.

41. a) Piirrä kuvaaja, joka esittää 5,0 MeV:n monokromaattisen γ-säteilyn intensiteetin vähenemistä betonissa. Puoliintumispaksuus betonissa on 11 cm.
b) Kuinka paksu betoniseinän pitää olla, jotta se vähentää 5,0 MeV:n monokromaattisen γ-säteilyn intensiteetin tuhannesosaan alkuperäisestä?

42. Monokromaattisen γ-säteilyn intensiteetti vähenee puoleen 12 mm paksussa lyijylevyssä. Kuinka paksussa lyijylevyssä intensiteetti vähenee 5,0 prosenttiin alkuperäisestä?

43. Avaruusluotaimessa oleva radioaktiivinen paristo toimii Pu-238-isotoopin avulla, jota on paristossa 1,0 kg. Pu-238:n puoliintumisaika on 87,7 vuotta, ja se hajoaa lähettämällä 5,5 MeV α-hiukkasia. Kuinka paljon sähkötehoa paristosta voi saada, kun se pystyy muuttamaan 8,0 % radioaktiivisen hajoamisen luovuttamasta energiasta sähköksi? $m(^{238}\mathrm{Pu}) = 238{,}05$ u.

44. Vuonna 1986 ydinvoimalaonnettomuus aiheutti Suomen maaperään saastelaskeuman, jossa oli mukana jodin radioaktiivista isotooppia ^{131}I. Eräällä seudulla mitattiin 11 vuorokauden kuluttua laskeuman jälkeen keskimäärin 15 500 ^{131}I:n hajoamista sekunnissa neliömetriä kohden maan pinnalla. Kirjoita ^{131}I:n hajoamisreaktioyhtälö. Mikä oli jodista aiheutuva aktiivisuus neliömetrillä välittömästi laskeuman tultua maan pinnalle, kun oletetaan, että koko laskeuma tuli alas lyhyenä aikana sateen mukana? Oletetaan, että laskeuma vastasi koko Suomen keskimääräistä arvoa. Mikä oli tällöin koko laskeuman ^{131}I-isotoopin massa Suomen maaperässä? Suomen pinta-ala on 337 000 km^2. Selitä lyhyesti, miten voitiin tietää, mitä radioaktiivisia isotooppeja laskeumassa oli. [Preliminäärikoe (MFKA) 2004, 9]

45. Kun luonnon hopeaa säteilytetään termisillä neutroneilla, syntyy kahta β^--aktiivista lyhytikäistä isotooppia ^{110}Ag ja ^{108}Ag.
a) Kirjoita näiden radioisotooppien hajoamisreaktiot.
b) Kun neutroneilla aktivoidun hopeanäytteen säteilyä seurattiin geigerlaskurilla mittaamalla 20 sekunnissa kertynyt pulssimäärä ajan funktiona, saatiin seuraavat tulokset:

Aika/s	20	50	80	110	140	170	200
Pulssimäärä	18 001	9 929	6 067	4 105	3 158	2 491	2 065
Aika/s	230	260	290	320	350	380	410
Pulssimäärä	1 720	1 451	1 277	1 135	962	846	720

Esitä graafisesti pulssimäärän logaritmi ajan funktiona ja määritä kuvan avulla pitkäikäisemmän isotoopin ^{108}Ag puoliintumisaika. (Isotooppi ^{110}Ag on oleellisesti lyhytikäisempi kuin ^{108}Ag.)

46. Tutkittavan henkilön verenkiertoon ruiskutetaan 1,0 ml nestettä. Neste sisältää ihmisperäistä valkuaisainetta, johon on lisätty radioaktiivista ainetta. Ruiskutetussa nesteessä on kokonaisaktiivisuus 1 000 yksikköä mielivaltaisella aktiivisuusasteikolla mitattuna. Odotetaan aika T, jonka kuluessa koko aktiivisuuden oletetaan jakautuneen tasaisesti koko verimäärään. Sen jälkeen henkilöstä otetaan 2,0 ml:n verinäyte, jonka kokonaisaktiivisuudeksi mitataan 0,15 yksikköä. Radioaktiivisen aineen puoliintumisaika on 0,8 T. Mikä on tämän perusteella henkilön verimäärä? [Lääk. 1998]

47. Kirjoita ^{210}Pb-ytimen hajoamisketjun kaikki mahdolliset hajoamisreaktiot stabiiliin ytimeen asti uraanin hajoamissarjan avulla (ks. s. 130).

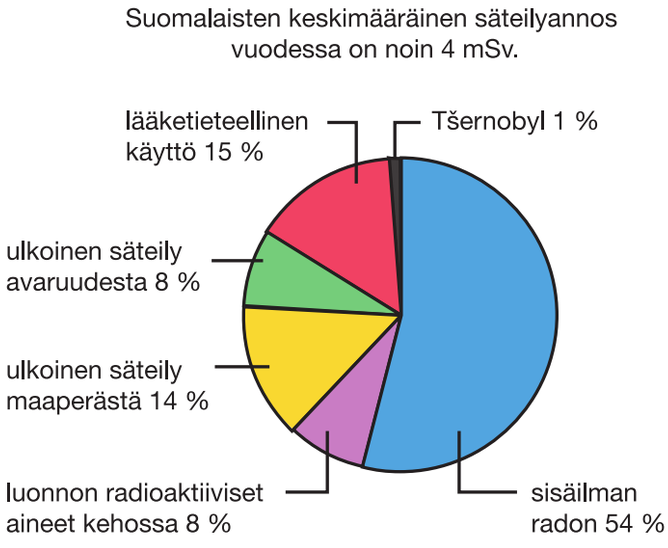
48. a) Mihin arkeologinen radiohiiliajoitusmenetelmä perustuu?
b) Maahan hautautuneen puukappaleen $^{14}_{6}$C-isotoopista johtuva aktiivisuus oli 15 Bq. Radiohiilen puoliintumisaika on 5 730 vuotta. Mittauksissa todettiin, että kasvavasta puusta otetun näytteen radiohiilestä johtuva aktiivisuus on 21 Bq. Kappaleissa oli hiiltä yhtä paljon. Arvioi, kuinka vanha puukappale oli.

49. Millä tavalla säteilysuoja tulisi rakentaa, jotta se pysäyttäisi
a) alfasäteilyn b) beetasätelyn?

50. Suomalaisten vuotuisesta säteilyannoksesta tilastollisesti yli puolet johtuu radonisotoopista ^{222}Rn, joka aiheuttaa mm. 15 % Suomen keuhkosyöpätapauksista.
a) Kirjoita ^{222}Rn:n hajoamista kuvaava yhtälö.
b) Mistä radon on peräisin, ja miksi se on ongelma erityisesti omakotitalojen sisäilmassa? Miten radonhaittoja voidaan torjua?

c) Uusien asuntojen sisäilmassa hyväksytään enintään radonpitoisuus 200 Bq/m^3 (aktiivisuus ilmakuutiometriä kohti). Paljonko radonia (grammoina) on tällöin kuutiometrissä ilmaa? [S2010, 9]

51. Ihminen altistuu ionisoivalle säteilylle jatkuvasti ainakin vähäisessä määrin. Oheinen diagrammi esittää suomalaisten vuosittain saaman keskimääräisen säteilyannoksen jakautumista eri säteilylähteiden osalle.
a) Mitä tarkoitetaan ionisoivalla säteilyllä? Tee selkoa sen eri lajeista.
b) Kerro lyhyesti kolmen kuvassa mainitun lähteen säteilevistä aineista ja/tai säteilyn laadusta. [K2004, 1]



52. Fuusiovoimalassa aiotaan käyttää polttoaineena deuteriumia ja tritiumia, jolloin yhtälön ${}^2_1\mathrm{H} + {}^3_1\mathrm{H} \rightarrow {}^4_2\mathrm{He} + {}^1_0\mathrm{n}$ mukaisesti reaktiotuotteeksi saadaan heliumia ja neutroneja.
a) Kuinka paljon energiaa saadaan 1,0 kg:sta polttoainetta?
b) Suomen vuotuinen energiantarve on nykyään noin 35 milj. toe. Kuinka paljon fuusiopolttoainetta tarvittaisiin Suomen vuotuisen energiantarpeen tyydyttämiseen? (toe = ekvivalentti öljytonni)

53. Vastaa fysikaalisesti perustellen.
a) Miksi potilas suojataan lyijylevyin röntgenkuvauksen ajaksi?
b) Alfa- ja beetasäteilyn kantama on enimmillään joitakin metrejä. Miksi Tšernobylin ydinvoimalaonnettomuuden jälkeen Suomessa kuitenkin mitattiin kohonneita säteilyarvoja?
c) Miksi ydinvoimalaitoksessa tapahtuneen radioaktiivisen päästöonnettomuuden jälkeen joillakin alueilla kehotetaan ottamaan joditabletteja?

54. Perustele lyhyesti, mitkä seuraavista väitteistä pitävät paikkansa ja mitkä eivät.
a) Luonnossa on aina jonkin verran ionisoivaa (”radioaktiivista”) säteilyä.
b) Röntgenkuvia otettaessa voidaan säteilylle herkkiä elimiä suojata lyijylevyillä.
c) Radonytimistä lähtevät α-hiukkaset voivat kulkeutua tuulen mukana pitkiäkin matkoja.
d) Pääasiallinen syy ydinjätteiden sijoittamiseen yli puolen kilometrin syvyydelle kallioperään on se, että jätteistä lähtevä säteily vaimenee kallioon. [K2003, 1]

55. Tee selkoa maailmankaikkeuden aineen rakennetta kuvaavasta standardimallista. Esittele mallin eri osat ja niiden merkitys.

56. Mitkä seuraavista väitteistä ovat tosia? Perustele vastauksesi.
a) Albert Einstein sai fysiikan Nobelin palkinnon suhteellisuusteorian luomisesta.
b) Ensimmäinen kokeellisesti havaittu antihiukkanen oli positroni, protonin antihiukkanen.
c) Hadronit ovat kvarkeista koostuvia hiukkasia. Hadronit voidaan jaotella mesoneihin (kaksi kvarkkia kussakin) ja baryoneihin (kolme kvarkkia kussakin).
d) Neutriinoita on kolmea eri tyyppiä. Neutriinon massa on vielä selvittämättä.

Vastauksia

1-4. a) $8{,}0 \cdot 10^{-16}$ J b) $1{,}3 \cdot 10^{-27}$ J
c) $6{,}9 \cdot 10^{-10}$ m
1-5. $3 \cdot 10^{-19}$ J … $5 \cdot 10^{-19}$ J
1-6. a) 2,6 eV b) $1{,}4 \cdot 10^{-27}$ kgm/s
1-7. $4 \cdot 10^{21}$
1-8. 28
1-9. $7{,}9 \cdot 10^{-6}$ eV
1-10. $5 \cdot 10^{17}$
1-16. a) $4{,}5 \cdot 10^{14}$ Hz; $4{,}3 \cdot 10^{-15}$ eVs; natriumin irrotustyö 1,9 eV b) 2)
1-17. 5,09 eV, nikkeli
1-18. a) kaliumilla kyllä, alumiinilla ei
b) 1,7 eV
1-19. $6{,}7 \cdot 10^{-34}$ Js, 520 THz
1-20. $E_k \leq 1{,}5$ eV
1-21. a) 554 nm b) $4{,}61 \cdot 10^{5}$ m/s
1-22. b) $4{,}14 \cdot 10^{-15}$ eVs; 542 THz; 474 THz; 2,24 eV; 1,96 eV
c) irrotustyö
1-23. a) 35 keV b) $1{,}9 \cdot 10^{-23}$ kgm/s
1-24. 0,82 V
1-25. 22,8 keV; 2,23 keV
1-26. a) $3{,}0 \cdot 10^{17}$ Hz b) $3{,}6 \cdot 10^{18}$ Hz
c) $\lambda \geq 35$ pm
1-28. c) $U \geq 8{,}3$ kV
1-29. a) 11,1 kV b) (8,1 keV) kupari
1-34. a, b, c, d
1-35. 0,40 pm
1-36. 0,10 nm
1-37. a) vähintään 2,2 nm b) 0,82 V

Testaa, osaatko s. 39
1. b **2.** b **3.** a c **4.** c **5.** a b **6.** a c
7. a b **8.** a b

2-7. A2, B1, C4, D5, E6, F3
2-8. b) −6,7 eV → −8,8 eV c) 1,1 μm
2-9. a) $1{,}00 \cdot 10^{10}$ Hz b) 2,99 cm
2-10. 2,9 PHz
2-11. b) 10,2 eV atomi virittyy; 15,6 eV atomi ionisoituu
2-12. a) ≤ 50,4 nm b) ≥ 2,9 Mm/s
2-13. a) $3{,}153 \cdot 10^{-19}$ J b) $8{,}320 \cdot 10^{5}$ m/s
c) 1,968 V
2-14. b) 3400 nm, 630 nm (punainen), 1 100 nm
2-15. 162 nm
2-16. a) 25,51 kV b) röntgensäteilyä, aallonpituus vähintään 48,61 pm
2-17. a) 5,14 eV b) 3,19 eV; 2,10 eV ja 1,09 eV c) 2,1 eV ensimmäiseltä viritystilalta perustilaan

Testaa, osaatko s. 61
1. c **2.** a b c **3.** c **4.** a **5.** c **6.** a b
7. a c **8.** a b c **9.** a c **10.** b c

3-10. vety ja helium
3-11. a) 656 nm b) 91,1 nm
3-12. 1) 121 nm
3-14. A, B ja E
3-18. 3) 52°
3-19. 1,2 ja 5
3-20. 92 pm

Testaa, osaatko s. 81
1. a b c **2.** a b c **3.** b c **4.** b **5.** c
6. a b c **7.** b **8.** a b c

4-7. 58 N
4-8. 63,62 u
4-9. b, c ja d
4-11. a) $1{,}44 \cdot 10^{17}$ kg/m^3
4-12. 0,0989405 u; 92,1625 MeV; 7,68021 MeV
4-13. a) 1,75682 u
4-14. 3) 143 ja 7,5910 MeV

Testaa, osaatko s. 95
1. b **2.** ac **3.** c **4.** a **5.** a **6.** c
7. b, c **8.** b **9.** b **10.** c

5-5. $^{234}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{230}_{90}\mathrm{Th} \rightarrow {}^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\mathrm{Po}$

5-6. a) $^{222}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{218}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

b) $^{221}_{87}\mathrm{Fr} \rightarrow {}^{217}_{85}\mathrm{At} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

c) $^{233}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{229}_{90}\mathrm{Th} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

5-7. a) $^{214}_{84}\mathrm{Po} \rightarrow {}^{210}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

b) $^{231}_{91}\mathrm{Pa} \rightarrow {}^{227}_{89}\mathrm{Ac} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

c) $^{240}_{94}\mathrm{Pu} \rightarrow {}^{236}_{92}\mathrm{U} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

5-8. a) $16 \cdot 10^6$ m/s b) 150 000

5-9. a) $^{225}_{89}\mathrm{Ac} \rightarrow {}^{221}_{87}\mathrm{Fr} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

b) 1) 0,0063717 u 2) 5,9352 MeV

5-10. b) 15,2 Mm/s

5-15 a) $^{23}_{10}\mathrm{Ne} \rightarrow {}^{23}_{11}\mathrm{Na} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$

b) $^{229}_{91}\mathrm{Pa} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{229}_{90}\mathrm{Th} + \nu$

c) $^{18}_{9}\mathrm{F} \rightarrow {}^{18}_{8}\mathrm{O} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \nu$

d) $^{225}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{225}_{89}\mathrm{Ac} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$

5-16. $^{66}_{28}\mathrm{Ni} \rightarrow {}^{66}_{29}\mathrm{Cu} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$,

$^{108}_{47}\mathrm{Ag} \rightarrow {}^{108}_{48}\mathrm{Cd} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$,

$^{8}_{5}\mathrm{B} \rightarrow {}^{8}_{4}\mathrm{Be} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \nu$, $^{52}_{26}\mathrm{Fe} \rightarrow {}^{52}_{25}\mathrm{Mn} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \nu$

5-17. a) kyllä b) ei c) ei d) kyllä e) ei f) ei

5-18. a) $^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$, 0,000167 u

b) $^{11}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{11}_{5}\mathrm{B} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \nu$, 0,001031 u

c) 2,130 MeV

5-19. a) 0,156 MeV

5-20. 15,112 MeV

5-21. a) $^{209}_{82}\mathrm{Pb} \rightarrow {}^{209}_{83}\mathrm{Bi} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$,

$^{210}_{83}\mathrm{Bi} \rightarrow {}^{206}_{81}\mathrm{Tl} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$ tai

$^{210}_{83}\mathrm{Bi} \rightarrow {}^{210}_{84}\mathrm{Po} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$

b) $^{211}_{85}\mathrm{At} \rightarrow {}^{207}_{83}\mathrm{Bi} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$ ja

$^{207}_{83}\mathrm{Bi} \rightarrow {}^{207}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \nu$ tai

$^{211}_{85}\mathrm{At} \rightarrow {}^{207}_{83}\mathrm{Bi} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$ ja

$^{207}_{83}\mathrm{Bi} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{207}_{82}\mathrm{Pb} + \nu$ tai

$^{211}_{85}\mathrm{At} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{211}_{84}\mathrm{Po} + \nu$ ja

$^{211}_{84}\mathrm{Po} \rightarrow {}^{207}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

5-26. a) kahdeksasosa b) 1) 2,5 m

5-27. 40 mm

5-28. 76 %

5-29. a) 3,0 $\frac{1}{\mathrm{m}}$ b) 0,24 %

5-30. 1) noin 1/3

5-32. a) 52 mm b) 41 %

5-33. b) $1/r^2$

Testaa, osaatko s. 127

1. b **2.** c **3.** b **4.** a c **5.** b c **6.** a **7.** a c **8.** a b **9.** b **10.** a b **11.** b

6-3. a) väärin b) oikein c) oikein

6-5. a) oikein b) väärin

6-6. a) α-, β- ja γ-säteily b) 82 min

6-8. a) $^{236}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{232}_{90}\mathrm{Th} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$ b) 102 kBq

6-9. 8,2 kBq

6-10. 200

6-11. a) $^{222}_{86}\mathrm{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\mathrm{Po} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$,

$^{218}_{84}\mathrm{Po} \rightarrow {}^{214}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$,

$^{214}_{82}\mathrm{Pb} \rightarrow {}^{214}_{83}\mathrm{Bi} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$,

$^{214}_{83}\mathrm{Bi} \rightarrow {}^{210}_{84}\mathrm{Po} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$, $^{206}_{82}\mathrm{Pb}$

b) 5 800 Bq

6-12. 360 d

6-13. a) 17 d b) $1{,}6 \cdot 10^{14}$ eV

6-14. a) 4,3 GBq b) 0,14 GBq

c) $^{128}_{53}\mathrm{I} \rightarrow {}^{128}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$,

$^{128}_{53}\mathrm{I} \rightarrow {}^{128}_{52}\mathrm{Te} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \nu$,

$^{128}_{53}\mathrm{I} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{128}_{52}\mathrm{Te} + \nu$

6-15. 230 MBq; 3,4 ml

6-18. 5 700 a

6-19. 11 000 a

6-20. a) $^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$ b) 7 920 a

6-21. (8 200 $\pm$ 100) a

6-22. 14 a

6-23. 4 800 a

Testaa osaatko s. 145

1. a b **2.** a b c **3.** a **4.** a b **5.** b c **6.** a c
7. b **8.** a b **9.** b c **10.** b c **11.** b c

7-1. ${}^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

7-3. a) 0,7 % b) 3–4 %

7-5. a) 1) ${}^{39}_{19}\mathrm{K} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{42}_{20}\mathrm{Ca} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$

2) ${}^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow \gamma + 2\left({}^{4}_{2}\mathrm{He}\right)$

3) ${}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{13}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$

4) ${}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{14}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$

5) ${}^{2}_{1}\mathrm{H} + \gamma \rightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$

b) −0,1236 MeV
7-6. a) 173,67 MeV b) 3,2689 MeV
7-7. a) 1,4 g b) $4 \cdot 10^{24}$ kpl
7-8. b) $1{,}7 \cdot 10^{6}$

7-9. a) ${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$ (+ 4,0 MeV),

${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$ (+ 3,3 MeV)

b) 49 000 kWh
7-10. a) $2{,}1 \cdot 10^{28}$ eV b) 1 000 km

Testaa, osaatko s. 163

1. a **2.** c **3.** a c **4.** a b c **5.** a **6.** a b c
7. a **8.** c **9.** a b c **10.** a b c

8-8. b) 3,7 TeV c) $3{,}5 \cdot 10^{-19}$ m

Testaa, osaatko s. 177

1. a b **2.** b d **3.** a b **4.** d **5.** b d
6. a c d **7.** a b c d **8.** a c **9.** a c **10.** b c

Kertaustehtävät

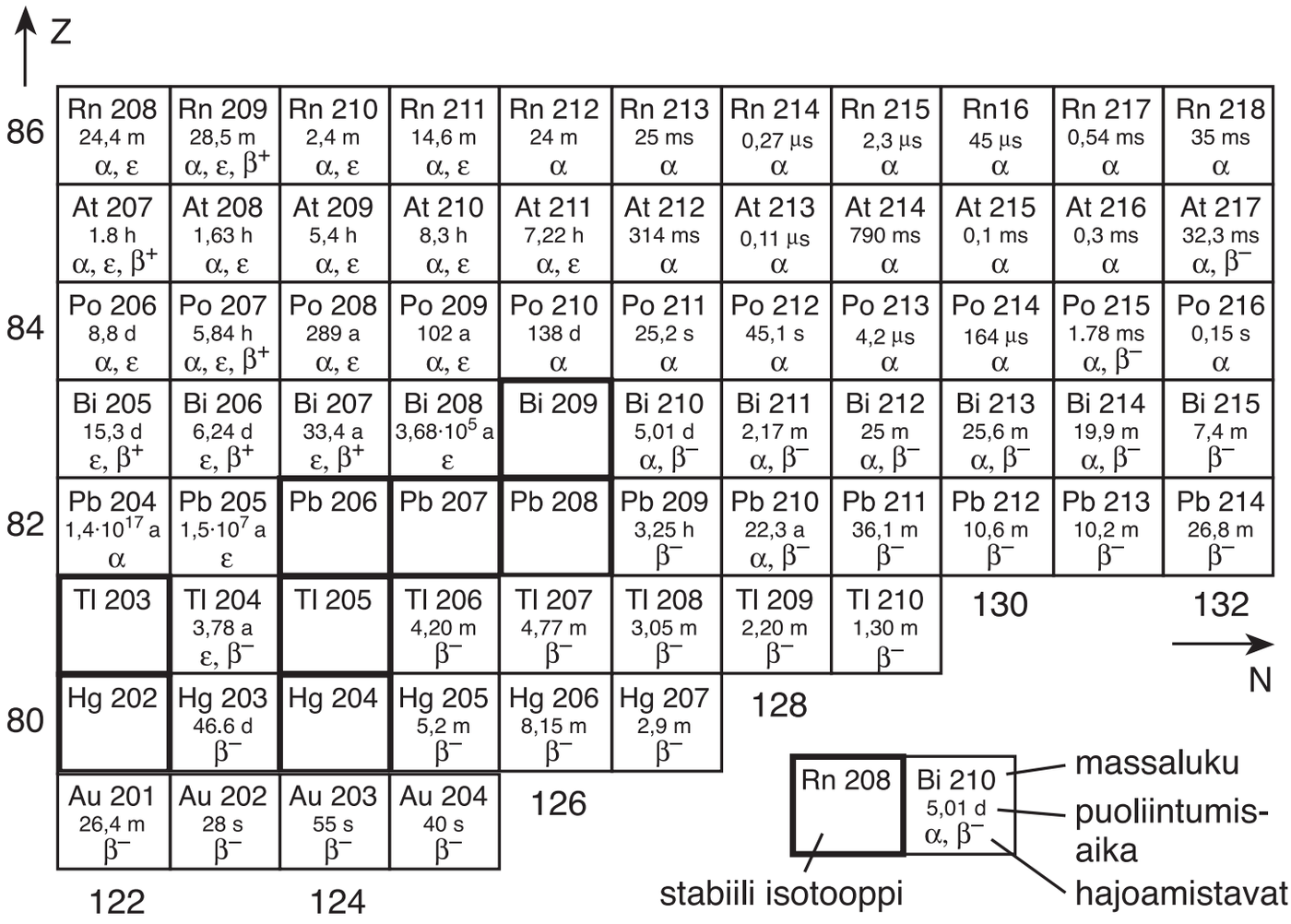
1. a **2.** a **3.** b
4. c **5.** b **6.** c
7. b **8.** b **9.** 2
10. b
12. d) 8,05 keV ja $4{,}3 \cdot 10^{-24}$ kgm/s
13. $3{,}5 \cdot 10^{19}$
15. a) 286 nm b) 180 nm
16. a) 3,2 eV b) 0,75 PHz c) $4{,}2 \cdot 10^{-15}$ eVs
17. b) (1,9 eV) cesium
19. a) (5,8 keV) mangaani
c) elektronisieppaus, rauta
20. Cu, Y ja Ba
21. a) 70 pm
28. a) ei b) 4,88 eV
29. $6{,}98 \cdot 10^{-27}$ kgm/s; 4,17 m/s
30. a) ei b) 120 nm c) 1,5 μm
31. 97,2 nm
33. c) natrium
34. 36°
36. a) 0,137006 u b) 1559,42 MeV
c) 7,53026 MeV
37. 0,7824 MeV
38. 4,8705 MeV; 55,5
39. 1,853 MeV
40. a) ${}^{33}_{17}\mathrm{Cl} \rightarrow {}^{33}_{16}\mathrm{S} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \nu$, 4,562 MeV;

${}^{40}_{17}\mathrm{Cl} \rightarrow {}^{40}_{18}\mathrm{Ar} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$, 7,505 MeV

b) ${}^{41}_{20}\mathrm{Ca}_{21} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{41}_{19}\mathrm{K}_{22} + \nu$
41. b) 1,1 m
42. 5,2 cm
43. 45 W
44. 2,9 g
45. a) ${}^{110}_{47}\mathrm{Ag} \rightarrow {}^{110}_{48}\mathrm{Cd} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$,

${}^{108}_{47}\mathrm{Ag} \rightarrow {}^{108}_{48}\mathrm{Cd} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \overline{\nu}$ b) 2,4 min
46. 5,6 l
48. b) 2 800 a
50. a) ${}^{222}_{86}\mathrm{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\mathrm{Po} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$ c) $3{,}5 \cdot 10^{-14}$ g
52. a) $3{,}4 \cdot 10^{14}$ J b) 4 500 kg
54. a) oikein b) oikein c) väärin d) väärin
56. a) epätosi b) epätosi c) epätosi d) tosi

Nuklidikartta



Hakemisto

aaltomalli 32
absorptiospektri 68
α-aktiivisuus 104
α-hajoaminen 104
alfasäteily 43, 143
alkeishiukkanen 166, 170
annihilaatio 113, 171
antiaine 171
antihiukkanen 170
atomimassayksikkö 88

baryoni 170
β-aktiivisuus 109
β^--hajoaminen 111
β^+-hajoaminen 113
beetasäteily 109, 143
Bohrin atomimalli 45
Braggin laki 76

Comptonin ilmiö 24
Coulombin valli 154

de Broglien aallot 34

eksoerginen reaktio 149
elektronisieppaus 115
emissiospektri 66
emittointi 47
endoerginen reaktio 149
energiatasokaavio 47

fissio 148, 151, 156
fluoresenssi 52, 74
fosforesenssi 52
fotoni 13
fuusio 148, 151, 153

gammasäteily 118, 122, 143

hadroni 170
hajoamisenergia 105
hajoamislaki 133
hajoamissarja 130
hajoamisvakio 134
heikko vuorovaikutus 169
hidastinaine 157
Higgsin bosoni 169
hiukkaskiihdytin 172
hiukkasmalli 33
hyötöreaktori 160

intensiteettipiikki 29
ionisointienergia 49
ionisoiva säteily 101
isotooppi 85

jarrutussäteily 28

kantama 104
kehäkiihdytin 173
ketjureaktio 156
kiehutusvesireaktori 159
kvantin energia 48
kvantittuminen 13, 29
kvantti 12
kvanttimekaniikka 58
kvanttiteoria 45
kvarkki 166

laser 55
leptoni 166
lineaarikiihdytin 172
loppusijoitus 158

massavaje 90
mesoni 170
mustan kappaleen säteily 12
myoni 167

neutriino 109
neutronisäteily 101, 143
nukleoni 84

ominaissäteily 29

painevesireaktori 158
parinmuodostus 122
perushiukkanen 166
perustila 47
perusvuorovaikutus 168
pimeä aine 174
pimeä energia 175
Planckin kvanttihypoteesi 13
puoliintumisaika 133
puoliintumispaksuus 119
pysyvä ydin 130

radiohiiliajoitus 140
radioisotooppi 148
rajataajuus 19
reaktioenergia 149
Rutherfordin atomimalli 43
röntgendiffraktio 75
röntgenemissio 73
röntgenfluoresenssi 74
röntgensäteily 27
röntgensäteilyn spektri 28

sidosenergia 90
sidososuus 91
sisäinen energia 89
spektri 65
standardimalli 167
stimuloitu emissio 55
syklotroni 173
synkrotroni 173
sähkömagneettinen säteily 10
säätösauva 157

tau 167
Thomsonin atomimalli 43
transuraani 149

vahva vuorovaikutus 87
valosähköinen ilmiö 17
viivaspektri 66
virittyminen 47
välibosoni 110
välittäjähiukkanen 168
väliydin 152

ydinvoima 87
ydinreaktio 102

Valokuvat

s. 7	iStockphoto
s. 8 vas.	SKOY/SPL
s. 8 oik.	iStockphoto
s. 9 vas.	iStockphoto
s. 9 oik.	NASA
s. 10 vas. ylh.	iStockphoto
s. 10 oik. ylh.	iStockphoto
s. 10 alh.	SKOY/Photo Researchers/ Meredith Carlson
s. 11 vas.	iStockphoto
s. 11 oik.	iStockphoto
s. 13	SKOY/SPL/Philippe Psaila
s. 15 vas.	NASA/Rick Scott & Joe Orman
s. 15 oik.	NASA
s. 17	Sampsa Kaijaluoto
s. 23 vas.	iStockphoto
s. 23 oik.	iStockphoto
s. 26	Fermilab/Fred Ullrich
s. 27 vas. ylh.	iStockphoto
s. 27 oik. ylh.	iStockphoto
s. 27 alh.	NASA
s. 28	SKOY/Corbis/Lester V. Bergman
s. 32 ylh.	Arsi Ikäheimonen
s. 32 alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 35	SKOY/SPL/Andrew Lambert Photography
s. 41	Getty Images/Don Farral
s. 42 vas.	SKOY/SPL/Royal Astronomical Society
s. 42 oik.	SKOY/SPL
s. 49 vas.	iStockphoto
s. 49 oik.	SKOY/Photo Researchers/ Giphotostock
s. 53 vas. ylh.	iStockphoto
s. 53 oik. ylh.	SKOY/Photo Researchers/ Ted Kinsman
s. 53 alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 54 vas.	iStockphoto
s. 54 oik.	iStockphoto
s. 55	iStockphoto
s. 58 vas.	SKOY/SPL/Equinox Graphics
s. 58 oik.	SKOY/SPL/Eric Heller
s. 59	IBM/Crommie, Lutz & Eigler
s. 60	SKOY/SPL/Laguna Design
s. 63	Getty Images/Nick Koudis
s. 64 vas.	NASA
s. 64 oik.	SKOY/SPL/Steve Gschmeissner
s. 65 ylh.	iStockphoto
s. 65 vas. alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 65 kesk. alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 65 oik. alh.	SKOY/SPL/Dept. of Physics, Imperial College
s. 66	iStockphoto
s. 67	SKOY/SPL/Imperial College, Dept. of Physics
s. 69 vas.	NASA
s. 69 oik.	NASA
s. 73 vas.	iStockphoto
s. 73 oik.	iStockphoto
s. 77 vas.	SKOY/SPL/Hybrid medical animation
s. 77 oik.	SKOY/SPL/Desy
s. 78 vas.	SKOY/SPL/Steve Gschmeissner
s. 78 oik.	SKOY/SPL/Pasieka
s. 79 vas. ylh.	SKOY/SPL/Dept. of Anatomy/P. Motta
s. 79 oik. ylh.	SKOY/SPL/Eye of Science
s. 79 alh.	SKOY/SPL/NASA/ JPL-Caltech
s. 83	NASA
s. 84 vas.	iStockphoto
s. 84 oik.	SKOY/SPL/Arscimed
s. 86 vas.	iStockphoto
s. 86 oik.	SKOY/SPL/Mehau Kulyk
s. 87 vas.	SKOY/Corbis/Danny Lehman
s. 87 oik.	NASA

s. 91 vas.	iStockphoto
s. 91 oik.	iStockphoto
s. 97	iStockphoto
s. 98 vas.	SKOY/SPL/J-L Charmet
s. 98 oik.	SKOY/SPL
s. 99 vas.	SKOY/SPL
s. 99 oik.	SKOY/SPL/Ria Novosti
s. 100 vas. ylh.	iStockphoto
s. 100 oik. ylh.	iStockphoto
s. 100 alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 101	SKOY/SPL/Tudor Jones Goronwy
s. 102	Sampsa Kaijaluoto
s. 103 vas.	Sampsa Kaijaluoto
s. 103 oik.	Heikki Lehto
s. 104	SKOY/SPL/N. Feather
s. 105 vas.	Sampsa Kaijaluoto
s. 105 oik.	Arsi Ikäheimonen
s. 107	iStockphoto
s. 109 vas.	SKOY/SPL/Hank Morgan
s. 109 oik.	SKOY/SPL/Dr. Dobert Friedland
s. 110 vas.	Sampsa Kaijaluoto
s. 110 oik.	Heikki Lehto
s. 118	Sampsa Kaijaluoto
s. 119	SKOY/SPL/Health Protection Agency
s. 121 vas.	SKOY/SPL/Medical Physics/ Simon Fraser
s. 121 oik.	SKOY/SPL/Andrew Brookes
s. 123 vas.	SKOY/SPL/David Parker
s. 123 oik.	iStockphoto
s. 124	SKOY/SPL/Antonia Reeve
s. 129	Getty Images/Kevin Schafer
s. 130 vas.	Getty Images/SSPL
s. 130 oik.	iStockphoto
s. 134	Kuvaario/Tomi Leporinne
s. 135 ylh.	STUK/Tiina Jutila
s. 135 alh.	SKOY/SPL/Geoeye
s. 140 vas.	SKOY/SPL/Pasquale Sorrentino
s. 140 oik.	SKOY/Corbis/Christophe Boisvieux
s. 141	Museovirasto
s. 143 vas.	SKOY/Photo Researchers/ Meredith Carlson
s. 143 oik.	iStockphoto
s. 144	STUK/Tiina Jutila
s. 147	SKOY/SPL/Alexander Tsiaras
s. 148 vas.	TVO
s. 148 oik.	NASA
s. 151 vas.	iStockphoto
s. 151 oik.	SKOY/SPL/US Dept. of Energy
s. 154	SKOY/SPL/Los Alamos National Laboratory
s. 156 vas.	SKOY/SPL/Mikkeljuul Jensen
s. 156 oik.	SKOY/SPL/US Dept. of Energy
s. 157 vas.	SKOY/SPL/Patrick Landmann
s. 157 oik.	TVO
s. 160	Lehtikuva/AFP Photo/HO/ Tepco
s. 161 vas.	NASA/C. Burrows
s. 161 oik.	NASA
s. 165	NASA
s. 166 vas.	CERN Geneva
s. 166 oik.	CERN Geneva
s. 170 vas.	Kamioka Observatory, ICRR, The University of Tokyo
s. 170 oik.	CERN Geneva
s. 171 vas.	Getty Images/HMS Images/ Harry Sieplinga
s. 171 oik.	CERN Geneva
s. 172 vas.	Fermilab/Reidar Hahn
s. 172 oik.	Getty Images/Peter Ginter
s. 173 vas.	Getty Images/NASA
s. 173 oik.	CERN Geneva
s. 174 vas.	NASA
s. 174 oik.	NASA